

# Variaciones Isotópicas de Oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) en Foraminíferos Bentónicos, Bajo Condiciones Antiestuarinas en el Delta del Río Colorado

Miguel A. Santa Rosa-Del Río, Guillermo E. Avila-Serrano, Miguel A. Téllez-Duarte, Luis A. Cupul-Magaña, Oscar E. González-Yajimovich, Rafael Hernández-Walls, Rigoberto Guardado-France

Facultad de Ciencias Marinas  
Universidad Autónoma de Baja California  
Ensenada, B. C., México

msanta@uabc.edu.mx; gavila@uabc.edu.mx; Tellez@uabc.edu.mx; lcupul@uabc.edu.mx; yajimo@uabc.edu.mx; rwalls@uabc.edu.mx; rigoberto@uabc.edu.mx.

**Abstract**— Foraminifera tests record the isotopic concentration of their surroundings, which is used to determine environmental changes. The  $\delta^{18}\text{O}$  isotope is useful as a proxy for temperature and salinity to interpret ancient environments. Here we report isotopic ranges of benthic foraminifera communities of the Colorado River Delta. Sediment and in situ salinity and temperature were sampled in the sub-tidal of Baja California during four campaigns in 2009-2010. For the isotopic analyses, 300 individuals and subsamples were separated at the laboratory. In Thanatocoenosis, 40 species were identified and 13 in Biocenosis. The most abundant genera were *Ammonia* and *Criboelphidium*. The range in biocenosis was -2.15 to 5.94‰ (antiestuarine conditions), in Thanatocoenosis -3.04 to -0.74 (estuarine conditions).

**Keywords**— *Isotope, Biocenosis, Tanathocoenosis, Upper Gulf of California.*

**Resumen**— Las testas de foraminíferos registran la concentración isotópica del entorno, la cual es usada para determinar cambios ambientales. El isótopo  $\delta^{18}\text{O}$  es útil para interpretar ambientes antiguos como “proxy” de temperatura y salinidad. Aquí reportamos rangos isotópicos de comunidades de foraminíferos bentónicos del Delta del Río Colorado. Se realizaron cuatro campañas de muestreo (sedimento, salinidad y temperatura in situ.) durante 2009-2010, en la zona submareal de Baja California. Se separaron 300 individuos por muestra y submuestras en laboratorio para el análisis isotópico. Se identificaron 40 especies en Tanatocenosis y 13 en Biocenosis. Los géneros más abundantes fueron *Ammonia* y *Criboelphidium*. En biocenosis el rango fue -2.15 a 5.94‰ (condiciones antiestuarinas), en Tanatocenosis -3.04 a -0.74 (condiciones estuarinas).

**Palabras claves**— *Isótopos, Biocenosis, Tanatocenosis, Alto Golfo de California.*

## I. INTRODUCCIÓN

Históricamente los deltas han jugado un papel importante en la historia de la humanidad. La existencia conjunta de tierras fértiles, agua y comunicaciones fluviales favorecieron el desarrollo de la agricultura y el comercio. Con el descubrimiento de nuevas fuentes de energía, el papel económico de los deltas se incrementó notablemente, ya que se desarrollan en cuencas sedimentarias que favorecen el depósito, maduración y retención de hidrocarburos. Por esta razón, la importancia económica de los deltas incrementó su estudio geológico en los últimos 30 años, favoreciendo una mejor comprensión de los procesos sedimentarios y la organización estratigráfica de sus depósitos (Santa Rosa-del Río, 2008). Estos estudios también han revelado un notable impacto antropogénico, que en algunos casos han ocasionado una transformación sensible del ecosistema, como es el caso del Delta del Río Colorado.

El Río Colorado recorre aproximadamente 2,334 km desde su nacimiento en las Montañas Rocallosas, en Colorado, USA., hasta su desembocadura en el Golfo de California donde se localiza el delta del Río Colorado entre los  $31^{\circ} 37'$  y  $31^{\circ} 45'$  de latitud norte y los  $114^{\circ} 10'$  y  $114^{\circ} 52'$  de longitud oeste (Fig. 1). Su cuenca de drenaje comprende un área aproximada de 644,000 km<sup>2</sup> (Bustillos-Duran, 2004). Hasta antes de la construcción de presas, en su desembocadura las aguas se enriquecían con el abundante material en suspensión rico en nutrientes, dando lugar a una alta productividad bentónica,

como lo evidencian los millones de conchas que conforman las cordilleras o cheniers localizados a lo largo de la costa de Baja California (Thompson, 1968; Kowalewsky et al., 2000). Con la construcción de la presa Hoover en 1935, y Glenn Canyon en 1963, se logró el control definitivo de las aguas del río, y con ello, la obstrucción del aporte de sedimentos al delta, ocasionando así que actualmente se encuentre en proceso de erosión (Van Andel, 1964; Baba et al., 1991; Carriquiry y Sánchez, 1999). Paralelamente, durante y después de la construcción de las presas a lo largo del cauce del Río Colorado, la disminución de las descargas de agua dulce al Golfo de California ocasionó un drástico cambio ambiental agudizado a partir de 1970, tras el corte casi total de sus descargas al golfo (Álvarez-Borrego, 1983). Posteriormente, el río ha fluído hacia México solo durante temporadas de lluvias extraordinarias, cuando se rebasan los límites de almacenaje de las presas (Lavín y Sánchez, 1999).

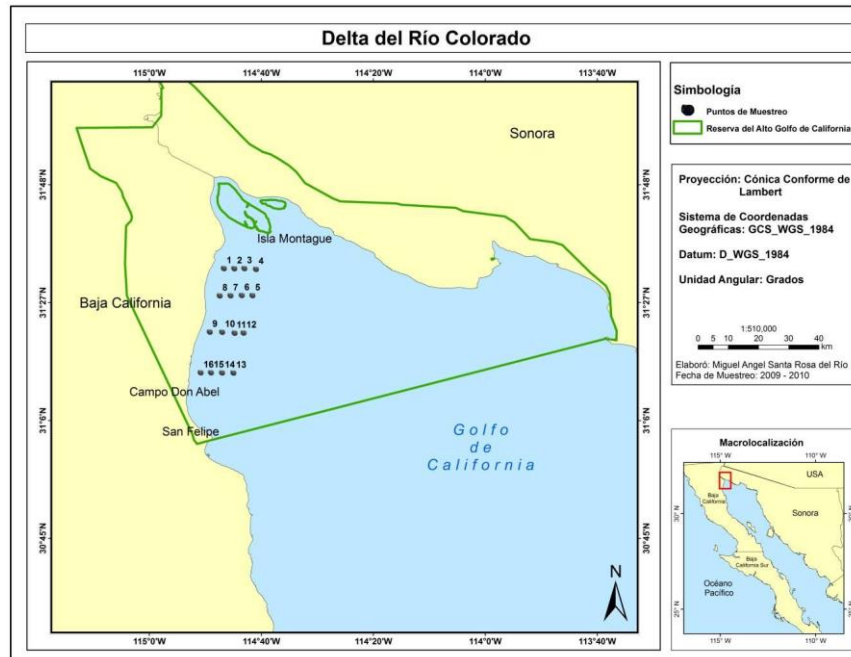


Fig. 1. Localización del área de estudio con la ubicación de las estaciones de muestreo.

El impacto ecológico más notable como consecuencia de la ausencia de aporte de agua dulce es la radical transformación del antiguo estuario en antiestuario como lo mencionan en sus trabajos Carbajal et al. (1997) y Lavín et al. (1997), reportan que existía un gradiente de salinidad de 12 a 34‰, y actualmente llega hasta 36.8‰ (Carbajal et al, 1997). Por su parte Carriquiry y Sánchez (1999), que estudiaron los sedimentos del Delta del Río Colorado, confirman con estudios previos y análisis que ellos realizaron, la condición antiestuarina del antiguo estuario de dicho delta. Estas condiciones antiestuarinas se acentúan hoy en día, ya que los valores pueden elevarse hasta 48‰ (Santa Rosa-del Río et al, 2011). Como consecuencia del deterioro ambiental, varias especies de flora y fauna se encuentran seriamente amenazadas o en peligro de extinción, como es el caso de la totoaba (*Totoaba macdonaldi*), la vaquita marina (*Phocoena sinus*), el palmoteador de Yuma (*Rallus longirostris yumanensis*), entre las más relevantes. La almeja del delta *Mulinia coloradoensis*, es la que más dramáticamente permite visualizar la magnitud del impacto (Rodríguez et al, 2001), ya que actualmente solo existen pequeñas poblaciones en las proximidades de la desembocadura del río, cuando en el pasado reciente abundaba en toda el área deltaica (Téllez-Duarte et al, 2008a).

El uso de isótopos estables, en especial de isótopos de oxígeno ( $\delta^{18}O$ ), ha sido muy útil para caracterizar e interpretar ambientes antiguos, ya que permite usarlos como proxy de variables ambientales, como la temperatura y salinidad (Grossman y Ku, 1986). Estudios previos en conchas de

moluscos estuarinos del Delta del Colorado, han demostrado que con base a los rangos de  $\delta^{18}\text{O}$  inferidos por la comparación de una concha actual y una antigua, a mayor cantidad de agua dulce que entra en la zona de mezcla los valores de  $[\delta^{18}\text{O}]$  tienden a ser menores a  $-2.5\%$ ; y sucede lo contrario al disminuir esta agua, son más positivos los valores a menor dilución de agua dulce y condiciones más marinas (Rodríguez et al., 2001). Esto también se ha observado en el bivalvo *Protothaca grata* en registros arqueológicos prehistóricos (Téllez-Duarte et al, 2008b), quienes encontraron en un conchero ubicado en el límite sur del Delta del Río Colorado, aproximadamente a 65 km de su desembocadura, valores entre  $-3.44\%$  y  $-3.99\%$ , lo que indica condiciones estuarinas.

Una forma independiente de analizar los cambios en la ecología bentónica es a través de los foraminíferos bentónicos. Al distribirse casi en la tercera parte del fondo oceánico incluyendo la zona costera, y construir conchas de carbonato de calcio que fijan en equilibrio con las condiciones fisicoquímicas del agua circundante, permite reconstruir las condiciones ambientales en que vivieron (Staines-Urias, 2009). Otra ventaja es que son sensibles a los cambios ambientales, además de que se requiere de un tamaño de muestra pequeño para estudiarlos (Lipps, et al., 1979).

Poco se conoce de la ecología de foraminíferos bentónicos en el Alto Golfo de California. Entre los trabajos que se han realizado encontramos a Barbieri (1996), quién estudió los foraminíferos del intermareal, encontrando una baja diversidad y similitud en las asociaciones entre organismos presentes y fósiles, lo que daba un indicio de condiciones ambientales similares.

Ruvalcaba-Baroni (2005), encontró que la composición isotópica en conchas de foraminíferos fósiles indican condiciones estuarinas notablemente más pronunciadas durante el Pleistoceno hasta donde actualmente se encuentran los límites del delta.

Huerta-Tamayo (2007), comparó la composición isotópica de biocenosis y tanatocenosis, encontró que en estas últimas existe una persistente señal isotópica de la presencia de agua dulce en el área deltaica debido al promediado temporal.

Los estudios anteriores se han restringido a la zona intermareal, por lo que se desconoce la composición, estructura y ecología de los foraminíferos bentónicos submareales. Dicho lo anterior, este trabajo se enfoca a ello, analizando la variación espacial y temporal de la composición isotópica de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) en las testas de las biocenosis y tanatocenosis bajo las condiciones antiestuarinas actuales, con el propósito de relacionarlo con los cambios ambientales derivados de la alteración del ecosistema y establecer un marco de referencia para estudios futuros de la ecología del Delta del Río Colorado.

## II. MATERIAL Y MÉTODOS

Este estudio se realizó dentro del área natural protegida y Reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado en la zona submareal adyacente a la costa de Baja California, (Fig. 1, se usó el programa Arc Map 9.3 que ayuda a realizar mapas georeferenciados), por ser la que históricamente muestra las condiciones estuarinas más pronunciadas (Lavín y Sánchez, 1999).

Se realizaron cuatro campañas de muestreo en el transcurso de un año (Agosto-Noviembre, 2009 y Marzo-Junio, 2010), a lo largo de cuatro transectos perpendiculares a la línea de costa en las que se ubicaron en total 16 estaciones que cubren aproximadamente hasta el límite sur del área deltaica (Fig. 1). Cada estación fue georeferenciada mediante un sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés) marca Garmin e-Trex, para posteriormente poder realizar mapas de distribución de los foraminíferos en la zona de estudio. Por otro lado, en cada punto de muestreo se midió la salinidad con un refractómetro Vee-Gee STX-3 y la temperatura con un termómetro manual. Las muestras de sedimento se obtuvieron con una draga tipo "Petite Ponar" con capacidad de  $2.4\text{ dm}^3$ , desde una embarcación (lancha de pesca de 6.7 m de eslora). Con la draga se obtuvo submuestras de la parte

superficial donde se tomaron únicamente los primeros cinco centímetros de profundidad, considerando que el área donde se muestreó se localiza en una zona donde los sedimentos constantemente se encuentran en continua mezcla, dichas submuestras se vaciaron en bolsas de plástico y fijaron con alcohol etílico al 60% para su posterior análisis.

En el laboratorio para el análisis micropaleontológico las muestras se tiñeron con Rosa de Bengala siguiendo la metodología descrita por Walton (1952), para distinguir los foraminíferos vivos (biocenosis) de los muertos (tanatocenosis). Después de un periodo de 48 horas se tamizó en húmedo con una luz de malla de 62  $\mu\text{m}$  para eliminar los limos y arcillas. Las testas de foraminíferos se concentraron por filtración a través de un papel Whatman número 4 con un diámetro de 11 cm y se secaron en horno a una temperatura de 40°C. Posteriormente se tamizó y se separaron las fracciones entre 63 y 180  $\mu\text{m}$  debido a que no se encontraron testas en fracciones por encima de los 180  $\mu\text{m}$ . Finalmente se separaron 300 individuos por muestra para su identificación, considerando este número de individuos como el tamaño mínimo de muestra para obtener datos confiables (Lipps, et al., 1979). Tomando en cuenta que la densidad de las biocenosis era muy baja, los 300 individuos contuvieron organismos tanto de la biocenosis como de la tanatocenosis. Las especies identificadas se fotografiaron en un microscopio electrónico de barrido marca GEOL, modelo JSM-35C en la División de Ciencias de la Tierra del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Los foraminíferos fueron montados en placas y depositados en la bodega de paleontología de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC).

Para el análisis isotópico se utilizaron las testas de *Ammonia sp.*, por ya existir datos de la composición isotópica de sus conchas en el área (Téllez-Duarte et al, 2006; Huerta-Tamayo, 2007). Para ello se separaron 10 foraminíferos de cada estación tanto de la biocenosis como de la tanatocenosis cuya composición isotópica fue analizada en el Laboratorio de Isótopos Estables de la Universidad de Arizona, Tucson, E.U. Las muestras se sometieron a una reacción al vacío con 100% de ácido fosfórico deshidratado, a 70°C durante dos horas. Se analizó en un espectrómetro de masas Finnigan MAT 252 equipado con un dispositivo automático de muestreo de carbonatos Kiel-III. Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  se reportan con referencia al estándar V-PDB.

Para determinar si existen diferencias significativas espaciales (transectos) y temporales (a lo largo del ciclo anual), tanto para la biocenosis como para la tanatocenosis, a los datos de la concentración de  $\delta^{18}\text{O}$  se le aplicó un análisis de varianza (ANOVA), con el programa estadístico "R" versión 2.12.2; que actualmente es uno de los programas más utilizados en análisis estadísticos, ya que los datos presentan gran confiabilidad por ser un análisis robusto. Para ello, primeramente se probó la normalidad y homogeneidad de varianzas de los datos utilizando la prueba estadística de Shapiro-Wilks, que básicamente analiza que todos los datos presenten una distribución normal, puesto que nuestros datos no cumplen con este requisito, se optó por la prueba ANOVA tipo II, la cual nos ayuda a determinar cuáles son las diferencias que se encuentran entre los grupos analizados. Posteriormente y para tener mayor precisión en la interpretación de los datos, se realizó un análisis a posteriori utilizando la prueba de Tukey que confirma y determina cuáles fueron las temporadas más diferentes o cuándo mostraron similitud.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido a problemas logísticos y climáticos solo durante la temporada de verano se muestrearon dos de los cuatro transectos que se tenían contemplados (transecto II y III; Fig. 1), pero en las siguientes temporadas sí se completó todos los transectos. Las fechas de los muestreos se realizaron: 22 de agosto (verano) y 13 de noviembre (otoño) del 2009; 20 de marzo (invierno) y 18 de junio (primavera) del 2010. Las temperaturas del agua oscilaron de 20 a 31°C con un rango de salinidad de 34 a 49‰ (Tabla I).

Tabla I. Parámetros fisicoquímicos de las estaciones de muestreo (salinidad, temperatura y profundidad).

Punto de muestreo	Salinidad (‰)	Temperatura (°C)	Profundidad (m)	Punto de muestreo	Salinidad (‰)	Temperatura (°C)	Profundidad (m)
				Otoño E1	45	21	11.9
				Otoño E2	40	22	10.6
				Otoño E3	46	21	8.4
				Otoño E4	49	20	7.3
Verano E5	36	31	13	Otoño E5	40	22	13
Verano E6	38	30	12.3	Otoño E6	42	22	12.3
Verano E7	38	31	10.6	Otoño E7	40	22	10.6
Verano E8	37	30.5	10.4	Otoño E8	47	22	10.4
Verano E9	35	31	14.4	Otoño E9	42	22	14.4
Verano E10	37	30.5	11.9	Otoño E10	40	22	11.9
Verano E11	38	31	9.2	Otoño E11	42	23	9.2
Verano E12	38	30.5	6.8	Otoño E12	42	22	6.8
				Otoño E13	44	22	10.7
				Otoño E14	40	22	9.1
				Otoño E15	42	22	6.7
				Otoño E16	44	22	4.1
Invierno E1	38	21	11.9	Primavera E1	35	29	11.9
Invierno E2	38	20	10.6	Primavera E2	36	29	10.6
Invierno E3	36	20.5	8.4	Primavera E3	36	30	8.4
Invierno E4	36	20.5	7.3	Primavera E4	39	30	7.3
Invierno E5	36	20	13	Primavera E5	36	28	13
Invierno E6	38	20.5	12.3	Primavera E6	35	29	12.3
Invierno E7	36	21	10.6	Primavera E7	35	29	10.6
Invierno E8	36	22	10.4	Primavera E8	35	29	10.4
Invierno E9	37	21	14.4	Primavera E9	35	28	14.4
Invierno E10	36	21	11.9	Primavera E10	35	28	11.9
Invierno E11	37	21	9.2	Primavera E11	36	29	9.2
Invierno E12	37	20	6.8	Primavera E12	35	28	6.8
Invierno E13	36	21	10.7	Primavera E13	35	27.5	10.7
Invierno E14	37	21	9.1	Primavera E14	35	28	9.1
Invierno E15	37	21	6.7	Primavera E15	34	28	6.7
Invierno E16	37	20.5	4.1	Primavera E16	35	28.5	4.1

A. Composición y abundancia

Considerando todas las estaciones de muestreo, se identificaron un total de 40 especies, de las cuales 14 corresponden a la tanatocenosis que es el 95% del total de la población, pero solamente tres especies son más del 50% del total (*Ammonia sp.*; *Cribrorhynchus sp.* y *Rosalina sp.*), (Fig. 2). En la biocenosis solamente se identificaron 13 especies, son las más abundantes *Ammonia sp.* y *Cribrorhynchus sp.* (Fig.



2), comprenden el 86% del total de individuos (Tabla II). Estos organismos también han sido reportados por Huerta-Tamayo (2007) en la zona intermareal, sin embargo, el número de especies reportadas por ella es 10% inferior a lo encontrado en este trabajo para la zona submareal. Lo anterior indica que la zona intermareal es relativamente menos diversa que la zona submareal debido a que esta última presenta condiciones de menor rigor ambiental. Sanders (1969), propuso la teoría de estabilidad-tiempo, donde plantea que las comunidades de organismos bentónicos pueden ser de dos tipos: (1) “comunidades físicamente controladas”, son aquellas que se encuentran expuestas a cambios físico-químico severos, como ocurre en bahías hipersalinas, esteros, desiertos, entre las más importantes, y (2) “comunidades biológicamente acomodadas”, las cuales se presentan cuando las condiciones físico-químicas son uniformes durante un periodo de tiempo largo, de tal forma que se incrementan las interacciones biológicas y su diversidad. Por lo anterior, la zona submareal al ser más estable en comparación con la intermareal, es una de las razones que explica la mayor diversidad relativa encontrada (Sanders, 1969; Abele y Walters, 1979). No obstante que el rigor ambiental aún es considerable dadas las condiciones hipersalinas actuales, como ya se comentó anteriormente, la falta del aporte de agua proveniente del Río Colorado ha propiciado un cambio en la salinidad del área de estudio, éste cambio a su vez posiblemente ha provocado la modificación en la diversidad de especies de foraminíferos bentónicos que habitaban en el Alto Golfo de California.

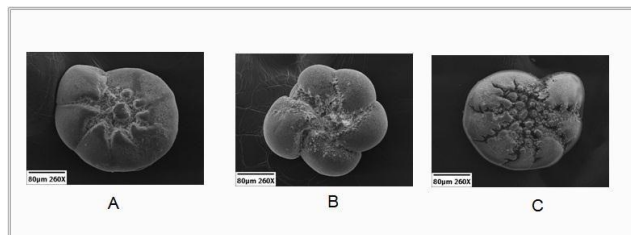


Fig. 2. Especies más abundantes: A) *Ammonia* sp, B) *Rosalina* sp, C) *Criboelphidium* sp.

### B. Composición isotópica

La variabilidad en la composición [ $\delta^{18}\text{O}$ ] de los foraminíferos mostró dos patrones: (1) invierno-primavera, caracterizada por valores negativos; y (2) verano-otoño, donde predominan valores positivos (Fig. 3). El rango de variación durante el ciclo anual fue de 8.09 ‰, con valores desde -2.15‰ hasta 5.94‰ (Fig. 3), lo cual es de esperar ya que actualmente el área se encuentra influenciada por fuertes variaciones en las condiciones físicoquímicas, principalmente temperatura y salinidad. Dado que actualmente no existe aporte de agua dulce al delta, estas variaciones isotópicas pueden ser atribuidas exclusivamente a estas dos variables. Los altos valores positivos pueden atribuirse a que actualmente el delta es una cuenca de evaporación. Por lo tanto, el rango de variación de los valores isotópicos indican para el caso de los foraminíferos bentónicos en el área de estudio, que un cambio de 11°C corresponde a una variación de 8.09‰ en la concentración isotópica de oxígeno, donde el valor más negativo de -2.15‰ sería el valor mínimo esperado por efecto exclusivamente de la temperatura y salinidad bajo las condiciones actuales de no flujo. Consecuentemente, valores isotópicos más negativos en testas de foraminíferos bentónicos submareales indicarían el aporte y/o dilución de agua isotópicamente más ligera, como podría ser la proveniente del Río Colorado.

Rodríguez et al, (2001), reportan valores de 0.79‰ hasta -2.48‰ para el molusco bivalvo *Chione fluctifraga*, en el Delta del Río Colorado en condiciones de ausencia de flujo de agua dulce; y valores de -1‰ hasta -6‰ para conchas fósiles del molusco bivalvo *Mulinia coloradoensis* que vivió en condiciones estuarinas, cuando las aguas diluidas del río se extendían hasta los 65 km de la boca del río. Fuera de este rango geográfico, Téllez-Duarte et al, (2008b), reportan un valor mínimo de -2.37‰

en conchas del molusco bivalvo *Protothaca grata* en un conchero arqueológico en Campo Cristina, aproximadamente 60 km al sur del límite del delta. Lo anterior sugiere que los rangos de variación isotópica relacionados por cambios en la temperatura son muy semejantes entre miembros de un mismo grupo taxonómico. Nuestros datos sobre foraminíferos bentónicos presentan un rango de variación más amplio que los reportados para bivalvos viviendo bajo las mismas condiciones ambientales. Estas diferencias pueden atribuirse al efecto vital que se presenta en organismos de diferentes taxa, los cuales responden ligeramente de forma distinta a una misma condición ambiental, ya que a pesar de que ambos organismos al momento de formar sus testas o conchas, fijan el oxígeno que se encuentra en el agua circundante. Así que el proceso de fijación puede diferir en organismos de diferentes taxa.

Tabla II. Listado de las especies de foraminíferos más abundantes encontradas en el ciclo 2009 – 2010.

Espece	Abundancia Relativa en Tanatocenosis (%)	Número de individuos	Abundancia Relativa en Biocenosis (%)	Número de individuos
<i>Ammonia beccarii parkinsoniana</i> (d'Orbigny, 1826)	28.19	5,653	64.5	676
<i>Criboelphidium excavatum</i> (Terquem, 1876)	15.99	3,206	21.6	226
<i>Rosalina sp</i> (d'Orbigny, 1826)	14.22	2,851	2.3	24
<i>Bucella tenerrima</i> (Bandy, 1950)	6.47	1,297	2.4	25
<i>Criboelphidium spinatum</i> var. <i>translucens</i> (Cushman and Brönnimann 1948)	6.36	1,276	X	X
<i>Ammonia sp</i> (Linné, 1758)	6.13	1,230	X	X
<i>Criboelphidium gunteri</i> (Cushman and Brönnimann 1948)	4.58	919	X	X
<i>Criboelphidium incertum</i> (Cushman and Brönnimann 1948)	3.99	800	X	X
<i>Criboelphidium poeyanum</i> (Cushman and Brönnimann 1948)	2.21	443	X	X
<i>Quinqueloculina sp 1</i> (d'Orbigny, 1826)	2.09	420	2.3	24
<i>Bolivina</i> (d'Orbigny, 1839)	X	X	1.1	12
<i>Bulimina marginata</i> (d'Orbigny, 1826)	1.37	274	1.7	18
<i>Quinqueloculina sp 3</i> (d'Orbigny, 1826)	1.12	224	X	X
<i>Nouria</i> (Heron-Allen y Earland, 1914)	X	X	1.6	17
<i>Quinqueloculina sp 2</i> (d'Orbigny, 1826)	1.08	217	X	X
<i>Miliolinella</i> (Wiesner, 1931)	X	X	0.8	8
<i>Buliminella elegantissima</i> (d'Orbigny, 1826)	1.02	205	0.7	7
<i>Pseudomasselina</i> (Lacroix, 1938)	X	X	0.5	5
<i>Fissurina</i> (Reuss, 1850)	X	X	0.3	3
<i>Reusella</i> (Galloway, 1933)	X	X	0.3	3
<i>Ammoscalaria pseudospiralis</i> (Williamson, 1858)	0.76	152	X	X

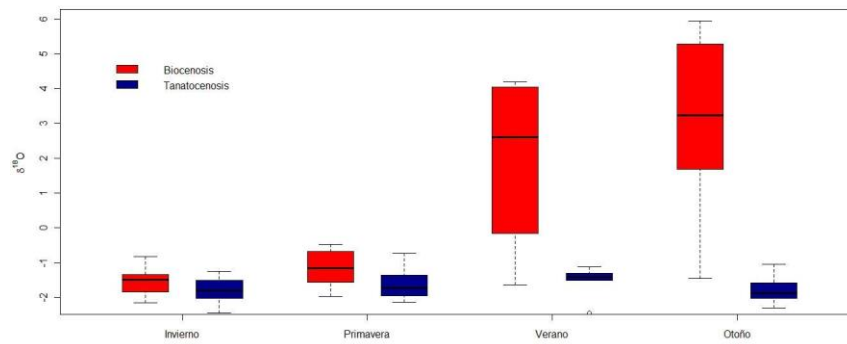


Fig. 3. Variación de la composición Isotópica de oxígeno [ $\delta^{18}O$ ] en la biocenosis y tanatocenosis

Por otro lado, Huerta-Tamayo (2007), reporta valores de  $-4.1\text{‰}$  en biocenosis de foraminíferos bentónicos intermareales para la temporada de invierno en la Isla Zacatosa, en la desembocadura del Río Colorado. Ella relaciona este valor a posibles descargas de agua dulce del drenaje agrícola del Valle de Mexicali, lo cual es por su cercanía a la desembocadura del río. Mientras que Staines-Urías y Douglas (2009), estudiaron el dimorfismo en foraminíferos bentónicos de aguas profundas en la Cuenca Pescadero, donde reportan una variación isotópica entre  $1.586\text{‰}$  hasta  $2.450\text{‰}$  en un rango de seis a nueve grados centígrados, es decir,  $0.864\text{‰}$  en tres grados centígrados, lo que implica  $0.288\text{‰}$  por cada grado centígrado. Por lo que respecta a este trabajo, en los foraminíferos bentónicos submareales deltaicos la variación isotópica fue de  $8.09\text{‰}$  en un rango de  $11^{\circ}\text{C}$  lo que corresponde a  $0.735\text{‰}$  por cada grado centígrado. La anterior diferencia se puede deber, como ya se comentó, al efecto vital, que a pesar de ser organismos pertenecientes a un mismo grupo taxonómico, responden de forma distinta ya que las condiciones ambientales a las que están expuestos son completamente diferentes, pues los individuos estudiados por Staines-Urías y Douglas (2009) son de aguas profundas, a una temperatura mucho menor que la que se presenta en nuestro caso en la zona submareal, donde la máxima temperatura registrada fue de  $31^{\circ}\text{C}$ .

Al aplicar un ANOVA tipo II a los datos isotópicos se encontró que las temporadas eran estadísticamente diferentes entre sí (Tabla III). Sin embargo, mediante la Prueba de Tukey se pudo identificar que las temporadas de Primavera – Invierno y Verano - Otoño son estadísticamente iguales (Tabla IV), y que otra posible combinación de las temporadas serían estadísticamente diferentes, como lo sería el caso de Otoño-Invierno, Verano–Invierno, Primavera–Otoño o Verano–Primavera.

Tabla III. Análisis de Varianza para Biocenosis durante el ciclo anual.

Análisis de Varianza (ANOVA tipo II)				
Fuente de variación	SS	Gl	F	Pr(>F)
Temporada	158.304	3	24.353	8.77E-09
Residual	78.004	36		



Tabla IV. Prueba de Tukey en Biocenosis, se aprecia la diferencia entre temporadas

Comparación Múltiple de las medias: Prueba de Tukey				
Temporadas	Estimación Std.	Error	Z value	Pr(> Z )
Otoño - Invierno = 0	4.6308	0.6192	7.479	<0.001
Primavera - Invierno = 0	0.3838	0.5774	0.665	0.90826
Verano - Invierno = 0	3.4688	0.8416	4.122	<0.001
Primavera - Otoño = 0	-4.247	0.6192	-6.859	<0.001
Verano - Otoño = 0	-1.162	0.8708	-1.334	0.53446
Verano - Primavera = 0	3.085	0.8416	3.665	0.00123

### C. Tanatocenosis

A diferencia de las biocenosis, las tanatocenosis no presentaron diferencias notables en la composición isotópica a lo largo del año (Fig. 3). Sin embargo, en todas las estaciones consistentemente los valores fueron negativos, más semejantes a las condiciones de invierno-primavera de las biocenosis, y aún con valores más negativos que esta. Al ser las tanatocenosis la acumulación de las conchas de foraminíferos muertos a lo largo del tiempo, y considerando que al hacer el análisis para identificar las comunidades de vivos/muertos se separaron individuos adultos no teñidos (Rosa de Bengala), todos aquellos foraminíferos que se separaron para su análisis, presentaron valores isotópicos más negativos que los que se encontraron en las biocenosis. Por lo cual, tomando como base los trabajos realizados por otros investigadores donde se establecen los rangos de variación isotópica para las condiciones actuales y para las condiciones cuando las aguas del Río Colorado llegaban libremente a su delta, es de esperar que las tanatocenosis muestren una señal isotópica de las condiciones estuarinas o de flujo de agua isotópicamente más ligera que dominaban antes del represo de las aguas del río.

Esta acumulación de generaciones o promediado temporal, representan las condiciones ambientales promedio después de varias generaciones, por lo que en nuestro caso permite inferir que las condiciones ambientales que se encontraban en los años anteriores al represo de las aguas del río, fueron dominadas por aguas isotópicamente más ligeras que las actuales. Lo anterior se puede corroborar con los diversos trabajos realizados en el área de estudio con moluscos bivalvos, donde han establecido los rangos isotópicos de oxígeno antes y después de la construcción de las presas en la parte alta del Río Colorado (Téllez-Duarte et al 2008b; Rodríguez et al 2001; Celis-Hernández, 2011).

Huerta-Tamayo (2007), reporta valores para tanatocenosis de foraminíferos bentónicos intermareales de -3.55‰ hasta -5.5‰, lo cual interpreta como indicativo de condiciones estuarinas hasta la playa “El Faro”, al Sur de San Felipe. Sin embargo, atribuye estos valores a que existe un promediado temporal posiblemente influido por la mezcla de foraminíferos fósiles provenientes de un cantil costero del Pleistoceno, sitio hasta donde se extendía el área deltaica cuando las condiciones ambientales eran más húmedas y los aportes del río mayores, como lo sugieren valores de hasta -7.36‰ en las testas de los foraminíferos fósiles reportados por Ruvalcaba-Baroni (2005).

Al comparar las concentraciones isotópicas para todo el ciclo anual tanto para las biocenosis como para las tanatocenosis (Fig. 3), se puede observar que en la tanatocenosis los rangos de variación isotópica van desde -0.74 hasta -3.04 ‰, como ya lo hemos comentado. Considerando que en la biocenosis el valor más negativo fue de -2.15‰, siendo éste valor en nuestro caso de estudio el límite de cambios exclusivamente influenciado por cambios en la temperatura y la salinidad. Por lo tanto, los valores reportados en este trabajo para la tanatocenosis son un indicador de las condiciones que dominaban en el área de estudio antes del represo del río. Además, tomando como base los trabajos de

Télliez-Duarte et al (2008b) y Huerta-Tamayo (2007), con valores de -3.44 a -3.99‰ y de -3.55 a 5.5‰, respectivamente, podemos afirmar que los valores reportados en este trabajo para la tanatocenosis, representan al igual que en los trabajos anteriormente mencionados, un ambiente dominado por aguas isotópicamente más ligeras a las actuales, y dado que se tiene el registro bibliográfico de cuando se comenzó a bloquear el flujo de agua dulce al delta, podemos decir que las concentraciones isotópicas encontradas en la tanatocenosis indican condiciones estuarinas o de flujo de agua isotópicamente más ligera.

Las variaciones isotópicas en biocenosis y tanatocenosis para el área muestreada en cada estación y temporada (Figs. 4a, 4b; las estaciones corresponden a las mostradas en la Figura 1, sin embargo no se presenta la totalidad de las estaciones de muestreo, debido a que presentaron valores bajos de voltaje, lo que no hace confiables los datos para una buena interpretación), muestran la relación entre la temperatura y la concentración isotópica de oxígeno. En la biocenosis (Fig. 4a), se espera que a mayor temperatura mayor será la concentración del  $\delta^{18}O$ , debido a la relación entre la temperatura y la evaporación, que para el Alto Golfo de California se han reportado valores de hasta 0.9 m/año en el extremo norte (Lavín y Organista, 1988).

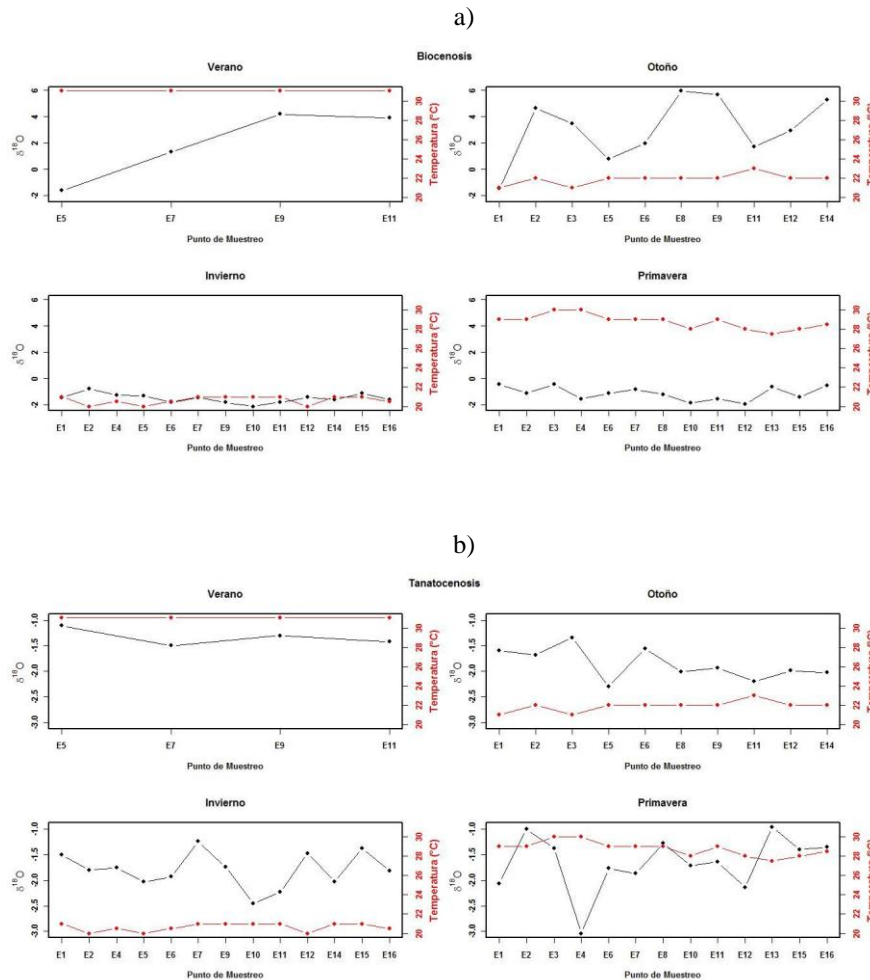


Fig. 4. Distribución de la temperatura y  $[\delta^{18}O]$  de la Biocenosis (a) y Tanatocenosis (b)

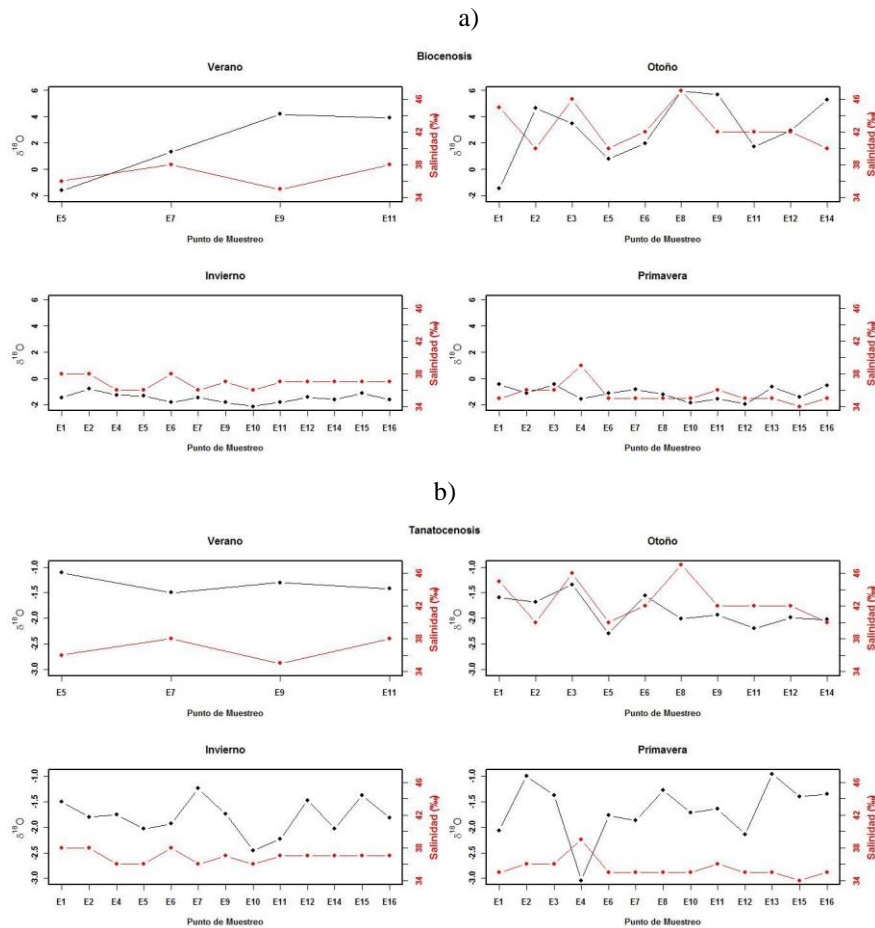


Fig. 5. Distribución de la salinidad y  $[\delta^{18}O]$  de la Biocenosis (a) y Tanatocenosis (b)

Sin embargo, se observó que la concentración isotópica varía muy ampliamente para una misma temperatura (Fig. 6), lo que podría explicarse debido a que el crecimiento óptimo de la especie analizada (*Ammonia sp.*), se encuentra en un rango de temperatura entre los 24° a 30°C (Usera y Blázquez, 1988). Por lo anterior y dado que en el área de muestreo se registraron temperaturas entre 20° a 31°C, es de esperar que dicha especie crezca prácticamente a lo largo de todo el año. Por lo que, en las biocenosis lo que se está registrando es un promedio de las temperaturas y salinidades a lo largo del ciclo de muestreo.

Es importante el considerar que para obtener la composición isotópica, se realizó sin discriminar juveniles de adultos, y por los resultados obtenidos en las variaciones isotópicas es posible que los organismos juveniles pudieran ser un mejor indicador puesto que sus testas, a diferencia de los adultos, tendrán menos tiempo de exposición a los cambios que ocurren en el agua circundante, siendo de esta forma útiles para obtener datos más puntuales. Por otro lado y estadísticamente hablando, la salinidad presentó una mayor correlación con el isótopo de oxígeno con un valor de  $r=0.62$  (Fig. 7). Esta prueba estadística se aplicó en ambas variables (salinidad y temperatura) como una herramienta más para poder visualizar la relación que presentan los foraminíferos bentónicos del Delta del Río Colorado con las condiciones ambientales en las cuales habitan, y de igual forma comprueban que el efecto vital en los organismos es diferente dependiendo del taxa al que pertenecen, puesto que individuos sometidos a un mismo rigor ambiental pero de diferentes taxa, responden de forma distinta a las condiciones ambientales que se presentan en el agua circundante. Lo anterior se puede comprobar con los análisis

realizados por Téllez-Duarte et al (2008b), que proponen la relación que existe entre la variación isotópica y la temperatura para moluscos bivalvos; así como Staines-Urias y Douglas (2009), que estudiaron foraminíferos bentónicos de aguas profundas, y también encuentran una relación entre la temperatura y la concentración de isótopos de oxígeno sin tomar en cuenta la salinidad. Mientras que en nuestro caso dicha relación no es tan fuerte o estrecha como en los anteriores, sin embargo, encontramos que esta relación está presente entre las variables de salinidad y  $[\delta^{18}\text{O}]$ , más que con la temperatura, aunque se debe tener claro que la salinidad está de cierta forma ligada a los cambios en la temperatura, tomando como base el principio de a mayor temperatura mayor la evaporación, y mayor la salinidad presente.

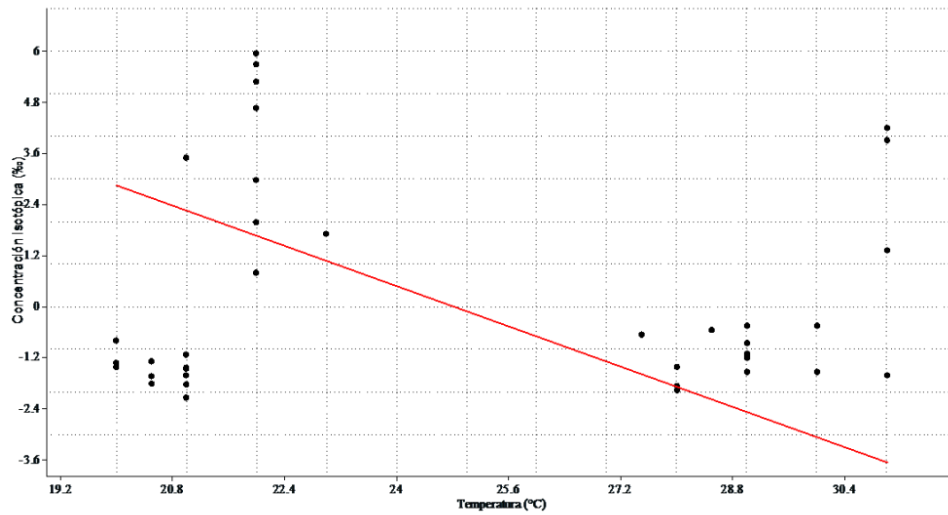


Fig. 6. Modelo de predicción entre la Temperatura y la  $[\delta^{18}\text{O}]$ .

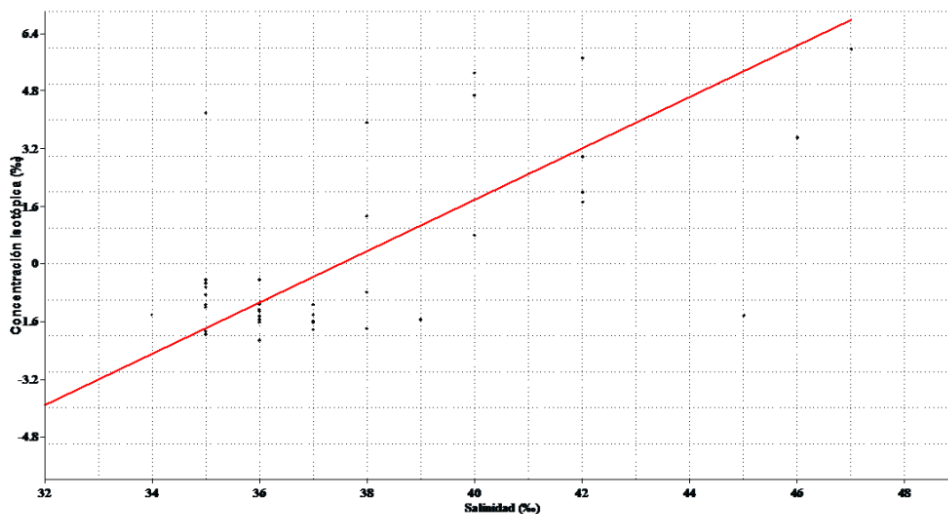


Fig. 7. Modelo de predicción entre la Salinidad y la  $[\delta^{18}\text{O}]$ .

En contraste para el caso de la tanatocenos (Fig. 4b), la concentración isotópica de [ $\delta^{18}\text{O}$ ] no mostró un patrón coincidente con las variaciones en la temperatura ni en la salinidad (Fig. 5b), esto se puede explicar debido a que las testas de foraminíferos de esta comunidad fijaron el [ $\delta^{18}\text{O}$ ] con unas temperaturas y salinidades diferentes a las que se presentaron al momento del muestreo y que se puede decir son las actuales. Considerando que antes de la construcción de las presas en la parte alta del Río Colorado, aproximadamente hace 78 años, el flujo de agua dulce al delta era continuo, posiblemente se podría esperar que las concentraciones isotópicas de estas tanatocenos de foraminíferos reflejen condiciones estuarinas o predominantemente influenciadas por agua isotópicamente más ligera, proveniente de dicho río de años anteriores al represo. Aunque también podría deberse a las temporadas extraordinarias de flujo que como comenta Lavín y Sánchez (1999), en el año de 1993 se presentó lluvias que sobre pasó los límites de almacenaje de las presas, obteniendo como resultado que las compuertas fueran abiertas y que el flujo de agua que llegó hasta el lado mexicano fuera mucho mayor que el que recibe normalmente, dando como resultado una posible descarga hasta el delta. Es posible que la tanatocenos aquí reportada pudiera incluso, mostrar las condiciones isotópicas diluidas de estas temporadas, sin embargo se recomienda para futuros análisis realizar una datación más precisa de las testas para estar conscientes del tiempo que se está representando, por el momento y al no tener dicha datación de la tanatocenos, y conociendo los valores isotópicos esperados para condiciones de flujo reportados por Rodríguez et al (2001), Huerta-Tamayo (2007) y Téllez-Duarte et al, (2008b), se puede vislumbrar cómo serían las condiciones ambientales en el caso de tener un flujo de agua dulce continuo al delta.

Lo anterior se comprobó al realizar la prueba estadística ANOVA, donde se encontró homogeneidad en las varianzas (Tabla V), lo que nos indica que las temporadas no muestran diferencias significativas entre sí. Esto se interpreta como las condiciones ambientales que imperaban en el área de estudio antes del represo del Río Colorado, debido a que las testas de los foraminíferos fijan el [ $\delta^{18}\text{O}$ ] del agua circundante, por tal motivo reflejan la composición isotópica del agua en la cual vivieron (Téllez-Duarte et al., 2008b).

Tabla V. Análisis de Varianza para Tanatocenos.

Análisis de Varianza (ANOVA Tipo I)					
Fuente de variación	Gl	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Temporada	3	0.9009	0.30031	2.6934	0.06314
Residual	31	3.4564	0.1115		

Como se ha comentado anteriormente, esta fijación de isotopos en las testas puede ser afectado o influenciado por la concentración de la salinidad, que según reportes bibliográficos para temporadas anteriores al represo, se encontraban entre los 35.2 y 35.7 ppm (Townsend, 1901). Estos valores son similares a los que se registraron para la temporada de primavera, dejando el resto de las temporadas (verano, otoño e invierno) con valores por encima de lo registrado para antes de las presas.

#### IV. CONCLUSIONES

Al no existir actualmente un aporte de agua isotópicamente más ligera por parte del Río Colorado, las variaciones isotópicas encontradas en las testas de los foraminíferos de la biocenosis se relacionan a cambios de la temperatura y la salinidad.

Dado que la tanatocenosis no fijó señales isotópicas actuales, representan un promedio temporal por la mezcla de generaciones existentes desde antes del represo de las aguas del Río Colorado hasta el presente.

El rango de variación en el  $[\delta^{18}\text{O}]$  en las biocenosis fue de 8‰, para un rango de temperatura de 11°C, mientras que en las tanatocenosis la variación isotópica fue de 2.3‰ para el mismo rango de temperatura.

Con nuestros datos y bajo las mismas condiciones, para una rango de salinidad de 14‰, se esperaría una variación de la  $[\delta^{18}\text{O}]$  de 8‰, en testas de foraminíferos vivos.

La biocenosis presentó una relación entre la concentración de isótopos de oxígeno y la salinidad, ésta última podría ser la causa junto con la temperatura de las variaciones isotópicas. Para el caso de las tanatocenosis no se observaron dichas variaciones isotópicas ligadas a los cambios en salinidad y temperatura.

Los datos isotópicos permitieron discriminar dos condiciones ambientales: temporadas cálidas (Verano–Otoño), y temporadas frías (Invierno-Primavera). En tanto en la tanatocenosis no se detectaron cambios importantes a lo largo del año debido al promediado temporal.

En la biocenosis no se registró una relación directa con la temperatura y concentración isotópica de oxígeno, debido a que los datos reflejan un promediado anual de la temperatura.

Se recomienda para futuros análisis considerar la discriminación de organismos juveniles de los adultos, ya que la mezcla de generaciones pueden producir un sesgo en cuanto a la interpretación de los datos, dado que organismos adultos representan un promedio anual de temperaturas, mientras que aquellos individuos juveniles al tener un menor tiempo de exposición, indicarían condiciones puntuales del ambiente en el que se desarrollan.

## RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por la Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas programa 360, por el CONACyT convenio CB-2007-01-84710. Especialmente al Dr. Robert G. Douglas Profesor Emérito de la Universidad del Sur de California (U.S.C.) por su colaboración en la identificación de los foraminíferos y al Dr. Edgar Torres Irineo, por su importante ayuda con los análisis en “R”.

## REFERENCIAS

- Abele, L.G., and Walters, K. (1979). Marine benthic diversity: A critique and alternative explanation: *Journal of Biogeography*, v. 6, p. 115–126.
- Álvarez-Borrogo, S. (1983). Gulf of California, in Ketchum, B.H., ed., *Ecosystems of the World. Estuaries and Enclosed Seas*: Elsevier Scientific, New York, p. 427–449.
- Baba, J., Peterson, C.D., and Schrader, H.J. (1991). Modern fine-grained sediment in the Gulf of California during the last century in Dauphin, J.P., and Simoneit, B.R.T., eds., *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*: AAPG Memoir, Tulsa, v. 47, p. 569–587.
- Barbieri, R. (1996) Syndepositional taphonomic bias in foraminifera from fossil intertidal deposits, Colorado Delta (Baja California, México): *Journal of Foraminiferal Research*, v. 26, p. 331–341.
- Bustillos Durán, S. (2004). El agua en la frontera México-Estados Unidos [Water on the Mexico-US border]: *Araucaria*, v. 5. no. 11. Recuperado de: [http://institucional.us.es/araucaria/nro11/monogr11\\_4.htm](http://institucional.us.es/araucaria/nro11/monogr11_4.htm). April 2013.



- Carbajal, N., Sousa, A., and Durazo, R. (1997). A numerical model of the ex-ROFI of the Colorado River: *Journal of Marine Systems*, v. 12, p. 17–33.
- Carriquiry, J.D., and Sánchez, A. (1999). Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss: *Marine Geology*, v. 158, p. 125–145.
- Celis-Hernández, A. K. (2011). *Explotación de Recursos Costeros y Condiciones Ambientales en el Delta del Río Colorado Durante la Prehistoria* (Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada 132 p.
- Grossman, E.L., and Teh-Lung, K. (1986). Oxygen and carbon isotope fractionation in biogenic aragonite: temperature effects: *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, v. 59, p. 59–64.
- Huerta-Tamayo, L. (2007). *Biocenosis y Tanatocenosis de Foraminíferos Bentónicos Como Indicadores de Cambios Ambientales en el Delta del Río Colorado* (Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada 76 p.
- Kowalewsky, M., Avila Serrano, G., Flessa, K.W., and Goodfriend, G.A. (2000). Dead delta's former productivity: two trillion shells at the mouth of the Colorado River: *Geology*, v. 28, p. 1059–1062.
- Lavín, M.F., and Organista, S. (1988). Surface heat flux in the northern Gulf of California: *Journal of Geophysical Research*, v. 93, p. 14033–14038.
- Lavín, M.F., Beier, E., and Badán, A. (1997). Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interannual. en Lavín, M.F., ed., *Contribuciones a la Oceanografía Física en México: Unión de Geofísica Mexicana*, Baja California, p. 41–171.
- Lavín, M.F., and Sánchez, S. (1999). On how the Colorado River affected the hydrography of the upper Gulf of California: *Continental Shelf Research*, v. 19, p. 1545–1560.
- Lipps, J.H., Verger, W.H., Bruzas, M.A., Douglas, R.G., and Ross, C.A. (1979). *Foraminiferal Ecology and Paleoecology: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, Tulsa, 187 p.
- Rodriguez, C.A., Flessa, K.W., and Dettman, D.L. (2001). Effects of upstream diversion of Colorado River water on the estuarine bivalve mollusc *Mulinia coloradoensis*: *Conservation Biology*, v. 15, p. 249–258.
- Ruvalcaba-Baroni, I. (2005). *Paleoecología de foraminíferos bentónicos del Pleistoceno en El Faro, Baja California*, (Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada 83 p.
- Sanders, H.L. (1969). Benthic marine diversity and the stability-time hypothesis: *Brookhaven Symposia on Biology*, v. 22, p. 71–81.
- Santa Rosa-del Río, M.A. (2008). *Estudio sobre la evolución del Delta del Po (Italia) con análisis sedimentológico y palinológico y comparación bibliográfica con el Delta del Ebro (España) durante el Cuaternario*, (Tesis de Maestría, Universitat degli Studi di Ferrara, Italia. Ferrara, 93 p.
- Santa Rosa-del Río, M.A., Avila-Serrano, G.E., Téllez-Duarte, M.A., Gonzalez-Yajimovich, O., and Cupul-Magaña, L.A. (2011). Distribución y abundancia de tanatocenosis de foraminíferos bentónicos en el delta del río Colorado: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 63, p. 429–442.
- Staines-Urías, F., and Douglas, R.G. (2009). Environmental and intraspecific dimorphism effects on the stable isotope composition of deep-sea benthic foraminifera from the Southern Gulf of California, Mexico: *Marine micropaleontology*, v. 71, p. 80–95.
- Téllez-Duarte, M.A., Huerta, L., Ruvalcaba, I., Avila, G., and Flessa, K.W. (2006). El  $\delta^{18}\text{O}$  en foraminíferos bentónicos como indicador ambiental de la influencia del agua dulce en ambientes estuarinos: el caso del delta del río Colorado: *Libro de resúmenes del X Congreso Nacional de Paleontología*, Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., 21-25 noviembre.

- Téllez-Duarte, M.A., Avila-Serrano, G. and Flessa, K.W. (2008<sup>a</sup>). Los Concheros arqueológicos del Delta del Colorado y el uso sustentable de los recursos naturales. *Memorias de balances y perspectivas de la historia de la Antropología e Historia de la Baja California 2000-2001*: Instituto Nacional de Antropología, México, D.F., p. 10–14.
- Téllez-Duarte, M.A., Avila-Serrano, G., and Flessa, K.W. (2008<sup>b</sup>). Environmental significance of oxygen isotopes in the bivalve *Protothaca grata* from archaeological sites in northeast Baja California: *Pacific Coast Archaeological Society Quarterly*, v. 39, p. 49–56.
- Thompson, R.W. (1968). Tidal flat sedimentation on the Colorado River Delta, northwestern Gulf of California: *Geological Society of America Memoirs*, v. 107, p. 133.
- Townsend, C.H., (1901). Dredging and other records of the US Fish Commission Steamer Albatrossa with bibliography relative to the work of the vessel: *US Fish Commission Report for 1900*, pp. 387–562.
- Usera, J., and Blázquez, A.M. (1998). Interpretación de la Dinámica Poblacional de *Ammonia beccarii* (Linné, 1758) (Foraminiferida, Protoctista) en el Cuaternario Continental de la Laguna de Villena (Alicante, España): *Coloquios de Paleontología*, v. 49, p. 145–167.
- Van Andel, T.H. (1964). Recent marine sediments of the Gulf of California, in van Andel, T.J., and Shor, G.G., eds., *Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium*: American Association of Petroleum Geologists Memoirs, v. 3, p. 216–310.
- Walton, W.R. (1955). Ecology of Living Benthonic Foraminifera, Todos Santos Bay, Baja California: *Journal of Paleontology*, v. 29, p. 952–1018.