

Variación espacio-temporal de la biomasa de zooplancton en un sistema estuarino del Caribe Occidental durante dos ciclos anuales

Spatio-temporal variation of zooplankton biomass in an estuarine system of the Western Caribbean during two annual cycles

Lourdes Vásquez-Yeomans¹, Iván Castellanos¹,
Eduardo Suárez-Morales¹ y Rebeca Gasca¹

¹El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad Chetumal, Av. Centenario Km. 5.5, A.P. 424, Chetumal, Quintana Roo 77014, México. rgasca@ecosur.mx

Abstract.- The bay of Chetumal, in the Western Caribbean, is regarded as an uniformly hypohaline and oligotrophic system. In order to define if the zooplankton biomass shows a homogeneous behavior in this coastal system we analyzed the spatio-temporal variation of this parameter (wet weight: mg m⁻³) during two years (1996, 1997). During 1996, the average annual biomass (11.56 mg m⁻³) was significantly lower than that recorded during 1997 (16.18 mg m⁻³). Slightly lower biomass values were observed in northerlies during both years, followed by dry and wet periods, thus suggesting seasonality in the dynamics of this factor in the zooplankton community. Monthly variations were also considerable and suggest that important changes could also be occurring at scales smaller than the seasonal or interannual. Between 45 and 51% of the biomass in 1996 and 1997 was distributed at the outermost and more saline stations of the bay regardless of the season. The high primary production usually related to the inner zone of the bay was not reflected in the zooplankton biomass; this was explained by local distributional restrictions of the resident herbivorous zooplankton and possibly to hypoxia related to local eutrophication. The interannual differences, with higher biomass, temperature, and salinity found in 1997 and also the weak seasonality of that year could be related to the regional effect of El Niño 1997-98. The zooplankton biomass in the bay was relatively low year-round regardless of the season; this was attributed to its low internal hydrographic energy, scarce aquatic vegetation, and to its isolation from the marine influence.

Key words: Secondary production, estuarine plankton, plankton ecology, wet weight biomass

Resumen.- La Bahía de Chetumal, en el Caribe Occidental es considerada uniformemente hiposalina y oligotrófica. Para definir si la biomasa de zooplancton muestra un comportamiento homogéneo en este sistema costero se analizó la variación temporal y espacial de este parámetro (peso húmedo: mg m⁻³) durante dos ciclos anuales (1996, 1997). Se obtuvieron muestras bimensuales en las épocas de nortes, secas y lluvias. Durante 1996, la biomasa anual promedio (11,56 mg m⁻³) fue significativamente menor a la de 1997 (16,18 mg m⁻³). Se observaron biomazas ligeramente mayores durante nortes en ambos años, seguidas por secas y lluvias, lo que sugiere una estacionalidad en el comportamiento de este factor de la comunidad del zooplancton. Las variaciones mensuales también fueron considerables y sugieren que podría haber cambios importantes a escalas menores a la estacional o interanual. Entre el 45 y 51% de la biomasa en 1996 y 1997 se distribuyó en las localidades más externas y salinas de la bahía independientemente de la época. La alta producción primaria que usualmente se asocia a la zona interna de la bahía no se reflejó en la biomasa del zooplancton, lo que se atribuyó a las limitaciones en la distribución local de los herbívoros del zooplancton residente y posiblemente a la hipoxia relacionada con eutrofización local. Las diferencias interanuales, con mayores valores de biomasa, temperaturas y salinidades en 1997, así como la débil estacionalidad de ese año (nortes) podrían estar asociadas con el efecto regional de El Niño 1997-1998. La biomasa de zooplancton en la bahía fue relativamente baja durante todo el año, independientemente de las épocas climáticas, lo que se atribuyó a su baja energía hidrográfica interna, su escasa vegetación acuática y a su aislamiento de la influencia marina.

Palabras clave: Producción secundaria, plancton estuarino, ecología del plancton, biomasa de peso húmedo

INTRODUCCIÓN

La complejidad estructural y funcional de los ambientes costeros está basada en su heterogeneidad espacial; los gradientes de salinidad, temperatura y concentración de nutrientes, y los patrones internos de circulación favorecen la elevada producción biológica que suele caracterizar estos ecosistemas (Esteves *et al.* 2008). En ellos las biotas presentan variaciones en composición de especies y biomasa estacionales detectables, producto de cambios cíclicos en los factores ambientales como régimen de vientos, pluviosidad y aportes de agua dulce, entre otros (Mcclusky & Elliot 2004). El zooplancton no es una excepción, sus patrones de variabilidad en composición, distribución y abundancia se establecen en función de su acoplamiento con los procesos físicos a distintas escalas (Mann & Lazier 2006, Marques *et al.* 2006).

El análisis de la distribución de la biomasa del zooplancton y su relación con los cambios de los factores hidrológicos en escalas espacio-temporales permite definir el funcionamiento trófico- productivo del sistema, medir su productividad y compararla con la de otros sistemas similares (Beers 1981, Gasca *et al.* 1994b, 1996, Baduini 1997, Jiang *et al.* 2007). Es por ello necesario implementar muestreos sostenidos en un determinado sistema para contar con líneas de base que permitan identificar cambios estructurales en la biomasa de la comunidad en escalas mensuales, estacionales e interanuales.

La Bahía de Chetumal es el sistema estuarino más grande del litoral del Caribe mexicano (ca. 2.560 km²); su profundidad es somera (2-5 m) y recibe aportes freáticos de diversos orígenes, pero principalmente del Río Hondo. Climatológicamente, muestra una dinámica estacional con épocas de secas, lluvias y nortes (Carrillo *et al.* 2009). Tiene el estatus de Zona de Conservación Ecológica, es área del Santuario del Manatí y ha sido reconocida como área de crianza de larvas de peces (Vásquez-Yeomans & González 1994, Carrillo *et al.* 2009). Es un sistema oligotrófico con zonas y episodios de hipoxia relacionados con el ingreso de desechos agrícolas en su zona más interna (Isaza *et al.* 2006). La influencia marina al interior de la bahía es limitada por una amplia barrera que la aísla del frente oceánico; esto la convierte en un sistema hiposalino (8-18).

Los estudios acerca de la biomasa del zooplancton en la bahía han sido limitados en términos de cobertura temporal (Gasca *et al.* 1994b), por lo que se desconoce si muestra patrones temporales (mensuales, estacionales o

interanuales) y de distribución espacial. A pesar de su aislamiento de la influencia marina, de su uniformidad en las características físicas, y baja productividad general, se espera que la biomasa del zooplancton de la bahía muestre variaciones temporales en distintas escalas y patrones variables en su distribución espacial. Así, a partir de muestreos realizados bimensualmente en la Bahía de Chetumal durante dos ciclos anuales (1996 y 1997), se describen y analizan las fluctuaciones temporales y espaciales de la biomasa del zooplancton en función de las condiciones locales.

MATERIALES Y MÉTODOS

La recolección de zooplancton se efectuó durante dos meses representativos de cada uno de los tres regímenes climáticos reconocidos en la región: nortes (enero, noviembre), secas (marzo, mayo) y lluvias (julio, septiembre) de 1996 y 1997. Los 13 sitios de muestreo seleccionados se establecieron tomando en cuenta la conformación de la bahía (Fig. 1) para lograr una mayor cobertura de las distintas condiciones del sistema. Se incluyeron muestras de las áreas de mayor aporte de agua dulce (zonas internas cercanas a la desembocadura del Río Hondo) y las zonas con mayor influencia marina (zonas cercanas a la boca de la bahía).

Las muestras se obtuvieron mediante arrastres circulares superficiales con una duración de 10 min. Se utilizó una red estándar de 0,45 m de diámetro y abertura de malla de 0,333 mm. El volumen de agua filtrada se determinó con un flujómetro digital tipo torpedo General Oceanics adaptado a la boca de la red. Las muestras se fijaron y preservaron en formalina al 4% neutralizada con borato de sodio. Simultáneamente, se tomaron datos de salinidad por medio de un refractómetro (Aqua Pharma) y de temperatura superficial del agua con un termómetro de cubeta.

Se determinó la biomasa total de cada muestra de zooplancton empleando el método de peso húmedo (Beers 1981, Postel *et al.* 2000), sin separar en este proceso a los organismos gelatinosos. Se eligió esta técnica en virtud de que el material biológico puede emplearse para estudios posteriores. Se dejaron reposar las muestras de zooplancton por 20 días antes de efectuar las mediciones de biomasa para así evitar errores en la estimación generados por el proceso de fijación; los datos se expresan en mg m⁻³. Se efectuaron análisis estadísticos que incluyeron la transformación de los datos de biomasa ($\log_{10} +1$) y la aplicación de análisis de varianza (ANDEVA) para valorar las diferencias entre los distintos periodos

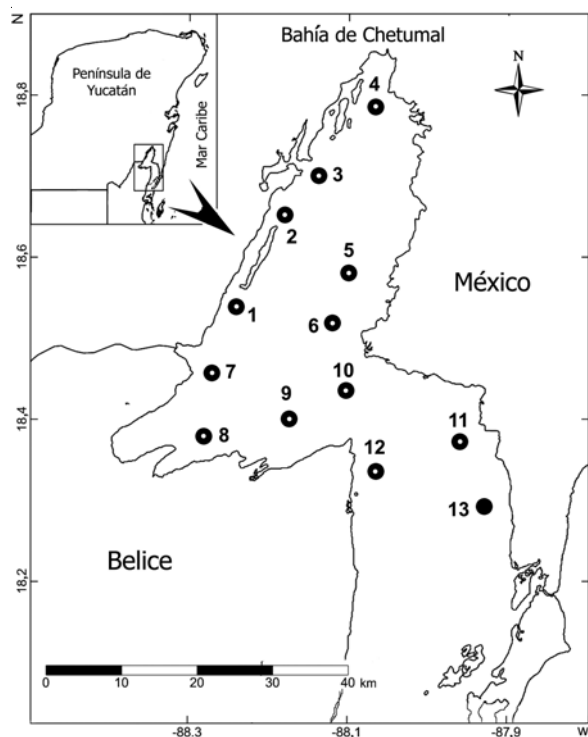


Figura 1. Ubicación relativa del área de estudio y de las localidades de muestreo en la Bahía de Chetumal, Caribe occidental / Relative location of the surveyed area and sampling sites in Chetumal Bay, western Caribbean

estacionales, detectar variaciones interanuales, mensuales, estacionales y entre las localidades; se utilizó el software estadístico Brodgar 2.7.1. Se aplicó la prueba de Tukey para determinar diferencias entre pares de medias y evaluar su significancia (Sokal & Rohlf 1989). Se graficaron los datos con diagramas de cajas (boxplot) para mostrar gráficamente los resultados.

RESULTADOS

TEMPERATURA Y SALINIDAD

Durante 1996, las temperaturas promedio mensuales oscilaron entre los $23,5 \pm 0,85$ y los $30,4 \pm 0,51$ °C; el promedio anual de temperatura fue de $27,64 \pm 2,83$ °C. Las mayores temperaturas se registraron de manera consistente en julio y septiembre con valores de 30-31°C; las menores se registraron en marzo y noviembre (22-24°C). El promedio anual de salinidad durante este año fue de $10,31 \pm 2,68$. La salinidad mensual presentó una variación de $8,23 \pm 1,64$ (enero) a $11,85 \pm 3,85$ (mayo). El menor valor de salinidad fue de 5 en la est. 7 de enero y el mayor en la est. 12 del mes de mayo, con 20.

En el ciclo de 1997, las temperaturas mensuales promedio fluctuaron entre $23,1 \pm 0,49$ °C y $31,1 \pm 0,86$ °C; el promedio anual de temperatura fue de $28,38 \pm 2,70$ °C. Los menores valores se presentaron en enero, con 22°C (est. 6) y los mayores en las estaciones 5 y 12 de septiembre, con 32°C. Los promedios mensuales variaron entre $10,38 \pm 1,26$ a $14,43 \pm 4,43$. El promedio anual de salinidad fue de $12,81 \pm 3,13$ con una variación anual de 16. La mínima ocurrió en noviembre, con 7 (est. 8) y la máxima se observó en mayo (23, est. 10).

No se detectaron diferencias significativas en la temperatura entre ambos años ($F_{(1,154)} = 2,81$, $P = 0,095$), aunque fue ligeramente más elevada en 1997. La salinidad registrada en 1997 fue mayor ($F_{(1,154)} = 28,64$, $P < 0,001$) que en 1996. La variabilidad mensual de la temperatura mostró que los valores registrados en enero y marzo fueron significativamente menores a los demás en ambos años ($F_{(5,150)} = 113,59$, $P < 0,001$) (Fig. 2A). En la escala estacional, la temperatura fue más elevada en lluvias (Fig. 2B); en los sitios de muestreo la temperatura fue uniforme durante el periodo bianual (Fig. 2C). La salinidad mensual 1996-1997 presentó valores más altos en mayo, julio y septiembre (Fig. 2D). En el plano estacional fue ligeramente menor en la época de nortes que en secas y lluvias durante ambos años ($F_{(2,153)} = 6,07$, $P = 0,002$) (Fig. 2E). Los promedios bianuales por localidad mostraron que la salinidad fue más elevada en las estaciones 9-13; las estaciones internas (1-6) presentaron salinidades significativamente menores ($F_{(12,143)} = 6,44$, $P < 0,001$) (Fig. 2F).

BIOMASA DEL ZOOPLANCTON

La biomasa presentó valores interanuales significativamente distintos ($F_{(1,154)} = 5,04$, $P = 0,026$), y fue mayor en 1997 que en 1996 (Fig. 3A). Estacionalmente, la época de nortes mostró valores más altos en ambos ciclos anuales ($F_{(2,153)} = 6,97$, $P = 0,001$) (Fig. 3B). Durante 1996 la biomasa presentó un valor promedio anual de $11,56 \pm 7,28$ mg m⁻³. Los promedios obtenidos durante las tres distintas épocas climáticas fueron: secas $10,22 \pm 7,85$ mg m⁻³, lluvias $10,27 \pm 5,54$ mg m⁻³, nortes $14,18 \pm 7,75$ mg m⁻³; la biomasa registrada en nortes fue significativamente mayor ($F_{(2,75)} = 3,74$, $P = 0,028$) a la de secas y lluvias (Fig. 3C). En la escala mensual las menores biomásas promedio ocurrieron durante mayo ($8,99 \pm 10,37$ mg m⁻³) y julio ($9,30 \pm 6,27$ mg m⁻³). Los mayores promedios se observaron en enero ($15,19 \pm 9,41$ mg m⁻³) y noviembre ($13,18 \pm 5,86$ mg m⁻³). Los valores de biomasa registrados en mayo, noviembre y enero fueron significativamente distintos a los demás de este año ($F_{(5,72)} = 2,84$, $P = 0,021$) (Fig. 3E).

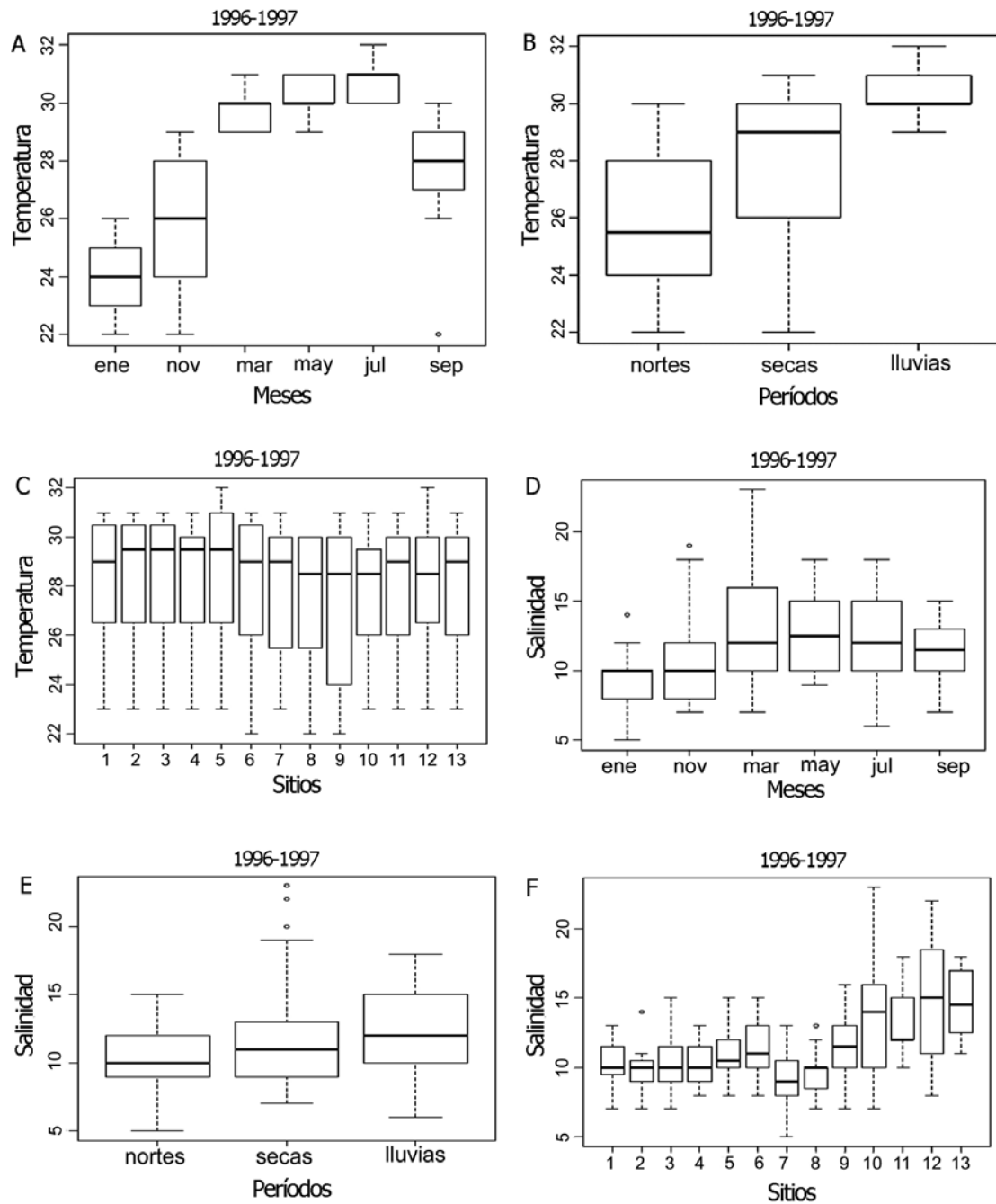


Figura 2. Variaciones temporales de la temperatura (°C) y la salinidad en la Bahía de Chetumal durante los dos ciclos anuales estudiados. A) temperatura promedio mensual acumulada 1996-97; B) temperatura promedio por épocas acumulada 1996-97; C) temperatura promedio por localidad, acumulado 1996-97; D) salinidad promedio mensual acumulada 1996-97; E) salinidad promedio por épocas acumulada 1996-97; F) salinidad promedio por localidad acumulada 1996-97 / Temporal variations of temperature (°C) and salinity in Chetumal Bay during the two studied annual cycles. A) monthly average temperature 1996-97; B) seasonal average temperature 1996-97; C) average temperature of sampling sites 1996-97; D) monthly average salinity 1996-97; E) seasonal average salinity 1996-97; F) average salinity of sampling sites 1996-97

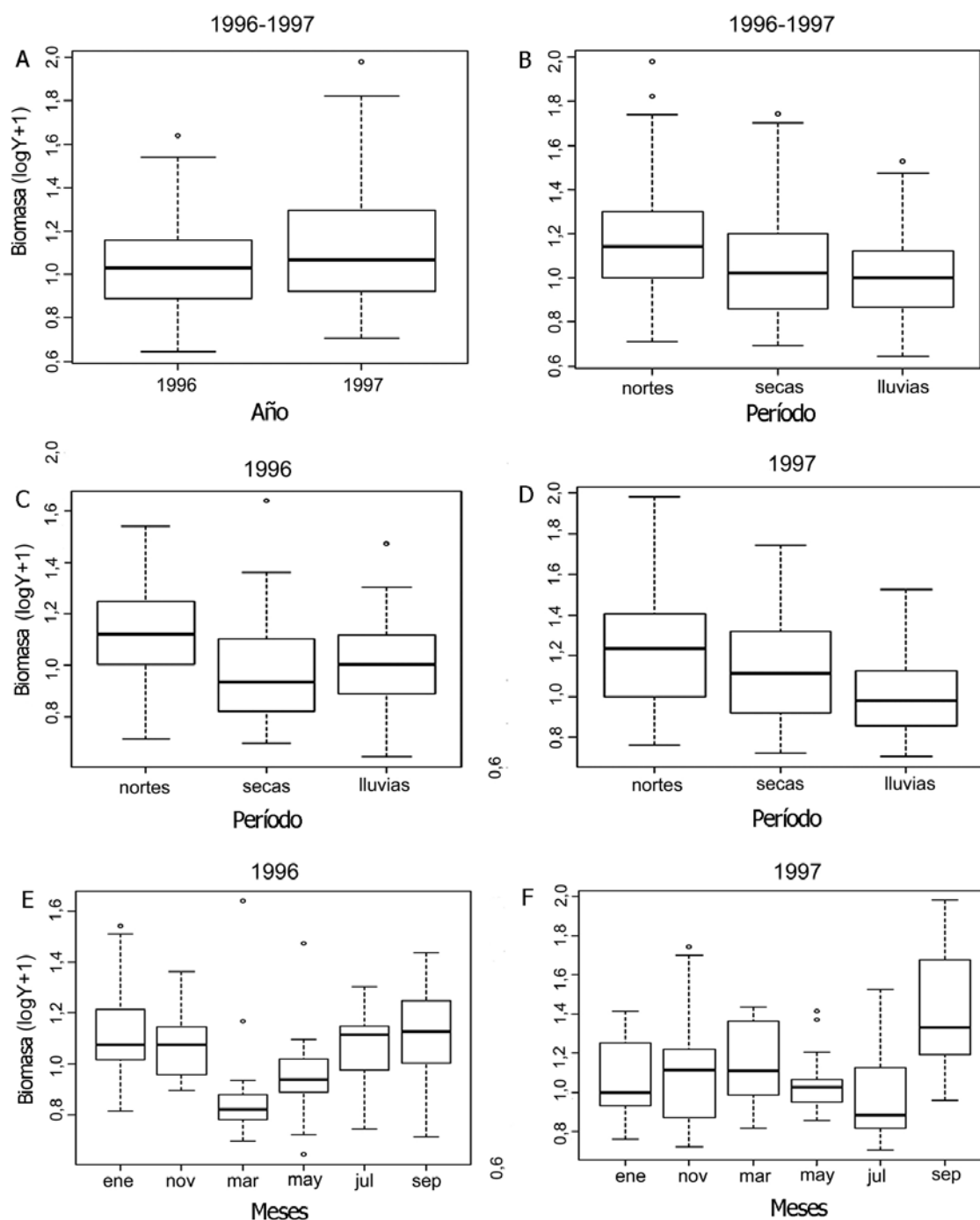


Figura 3. Variaciones temporales de la biomasa de zooplancton (mg m^{-3} , $\log_{10}+1$) en la Bahía de Chetumal durante los dos ciclos anuales estudiados. A) promedio anual 1996-97; B) promedio estacional 1996-97; C) promedio estacional 1996; D) promedio estacional 1997; E) promedio mensual 1996; F) promedio mensual 1997 / Temporal variations of zooplankton biomass (mg m^{-3} , $\log_{10}+1$) in Chetumal Bay during the two studied annual cycles. A) annual average 1996-97; B) seasonal average 1996-97; C) seasonal average 1996; D) seasonal average 1997; E) monthly average 1996; F) monthly average 1997

Durante 1997 la biomasa promedio fue de $16,18 \pm 15,17$ mg m^{-3} , superior al del ciclo anual previo. Los promedios de las 3 distintas épocas climáticas también fueron mayores a los correspondientes de 1996 en todos los casos: secas $15,71 \pm 12,46$ mg m^{-3} , lluvias $10,91 \pm 6,91$ mg m^{-3} , nortes $21,93 \pm 21,04$ mg m^{-3} ($F_{(1,154)} = 4,39$, $P = 0,015$); las diferencias entre las biomásas de los dos años en la época de nortes fueron menos marcadas que para las otras épocas (Fig. 3C y D). Los menores valores promedio mensuales ocurrieron durante septiembre ($10,44 \pm 7,97$ mg m^{-3}) y julio ($11,38 \pm 5,96$ mg m^{-3}); los mayores se registraron en noviembre ($31,78 \pm 26,0$ mg m^{-3}) y marzo ($16,53 \pm 16,28$ mg m^{-3}). El ANDEVA indica que en noviembre el promedio fue mayor que para los otros meses ($F_{(5,72)} = 4,25$, $P = 0,0019$) (Fig. 3F). Los valores mensuales de ambos años se presentan en la Tabla 1.

DISTRIBUCIÓN DE LA BIOMASA

En general, 45,5% de la biomasa total anual de 1996 se concentró en las estaciones 9-13, correspondientes a la zona más externa de la bahía. Los valores estacionales de biomasa en estas localidades fueron: secas: 49,6%, lluvias: 46,9%, nortes: 49,6%. El resultado de ANDEVA que compara la biomasa del zooplancton entre las estaciones de muestreo, indica que en 1996 la estación 12 presentó valores de biomasa significativamente mayores ($F_{(12,65)} = 2,26$, $P = 0,0184$) (Fig. 4A). La distribución estacional y promedio anual de las biomásas en 1996 en el área de estudio se presenta en la Fig. 5A-D.

Durante 1997 el 51,5% de la biomasa del zooplancton fue registrada en las estaciones más externas (9-13). En la escala estacional los valores correspondientes fueron:

Tabla 1. Valores de biomasa de zooplancton (mg m^{-3}) en cada localidad de muestreo, por mes y época climática en la Bahía de Chetumal durante el periodo 1996-97 / Zooplankton biomass values (mg m^{-3}) of each sampling site, month, and season at Bahía de Chetumal during the surveyed period 1996-97

Año	Est.	Nortes		Secas		Lluvias	
		Enero	Noviembre	Marzo	Mayo	Julio	Septiembre
1996	1	6,71	17,39	14,46	5,01	3,40	4,53
	2	27,31	16,67	8,04	5,69	6,74	8,42
	3	5,54	6,80	11,62	13,66	8,96	12,14
	4	9,37	7,25	6,86	7,60	9,15	11,97
	5	15,39	13,42	10,08	5,63	7,11	12,34
	6	10,76	12,14	10,82	4,57	4,27	8,49
	7	33,70	4,15	7,36	4,88	11,50	5,23
	8	15,28	15,02	11,68	6,06	9,77	17,81
	9	10,89	18,60	7,67	6,55	7,60	5,39
	10	11,41	12,23	12,98	3,96	6,43	10,83
	11	8,80	12,35	22,01	5,38	9,46	13,03
	12	31,40	26,28	9,71	42,53	28,81	19,05
	13	10,89	9,05	15,70	5,32	7,67	16,90
	Prom.	15,19	13,18	11,46	8,99	9,30	11,24
1997	1	4,80	46,30	4,30	24,36	9,64	5,32
	2	8,49	19,16	6,47	7,34	15,07	6,68
	3	9,00	20,46	5,84	22,07	10,69	6,80
	4	7,31	8,10	7,92	19,83	10,68	5,81
	5	7,42	10,26	4,75	9,24	7,93	5,56
	6	7,59	14,59	7,31	11,46	9,21	5,38
	7	9,72	65,59	18,00	8,40	7,92	11,62
	8	8,99	29,92	15,62	8,68	22,45	12,36
	9	17,03	16,26	12,03	26,19	6,39	16,50
	10	18,73	94,15	54,27	13,29	9,83	17,12
	11	16,85	24,54	15,31	5,57	6,17	32,58
	12	24,94	53,90	49,14	25,30	24,94	4,08
	13	16,09	9,95	13,88	11,92	6,98	5,93
	Prom.	12,07	31,78	16,53	14,90	11,38	10,44

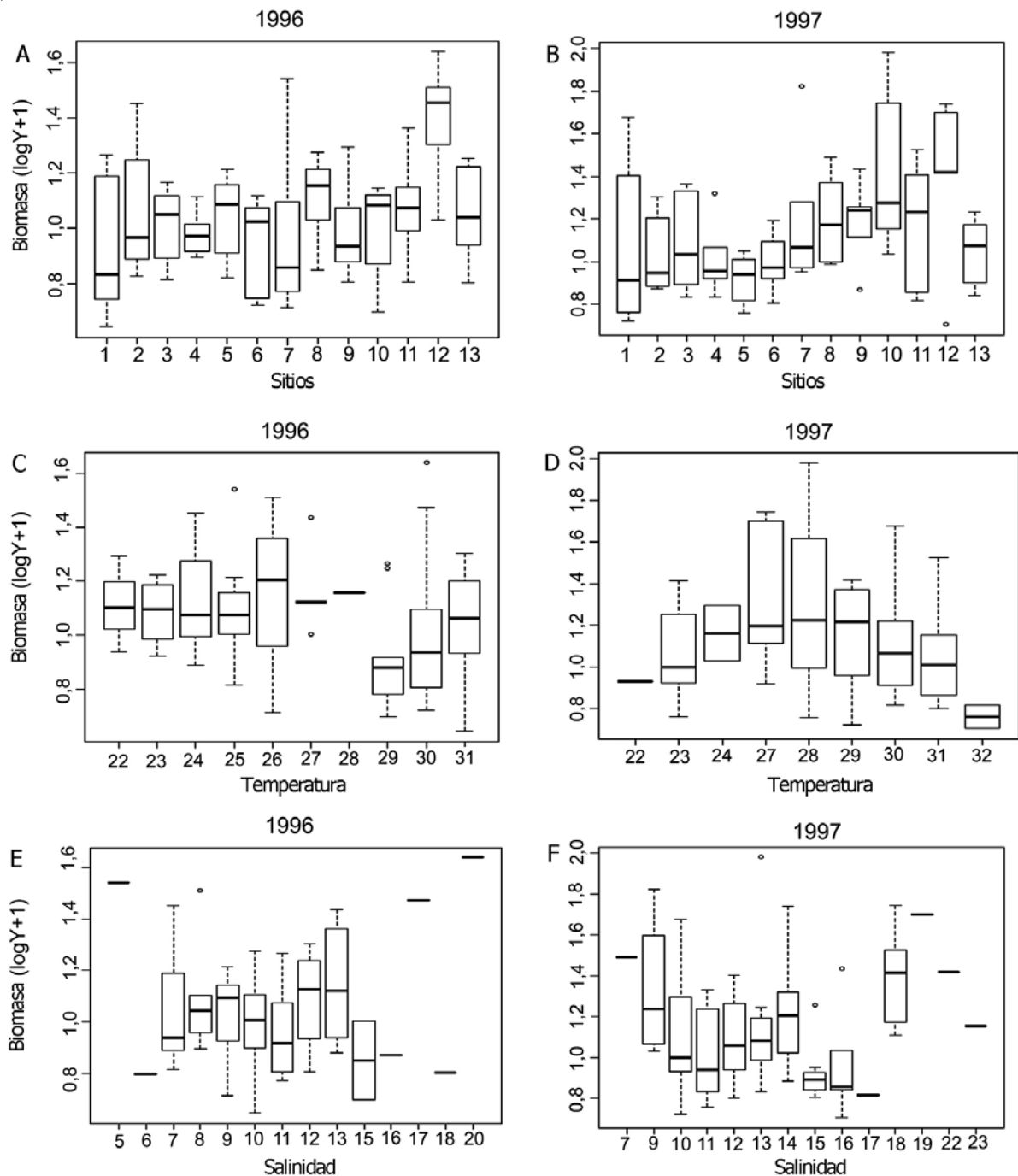


Figura 4. Variación de la biomasa promedio de zooplancton (mg m^{-3} , $\log_{10}+1$) de la Bahía de Chetumal en relación con distintos factores durante el periodo estudiado. A) biomasa en las estaciones de muestreo en 1996; B) biomasa en las estaciones de muestreo en 1997; C) biomasa y temperatura en 1996; D) biomasa y temperatura en 1997; E) biomasa y salinidad en 1996; F) biomasa y salinidad en 1997 / Variation of average zooplankton biomass (mg m^{-3} , $\log_{10}+1$) in Chetumal Bay as related to distinct factors during the surveyed period. A) biomass at sampling sites in 1996; B) biomass at sampling sites in 1997; C) biomass and temperature in 1996; D) biomass and temperature in 1997; E) biomass and salinity in 1996; F) biomass and salinity in 1997

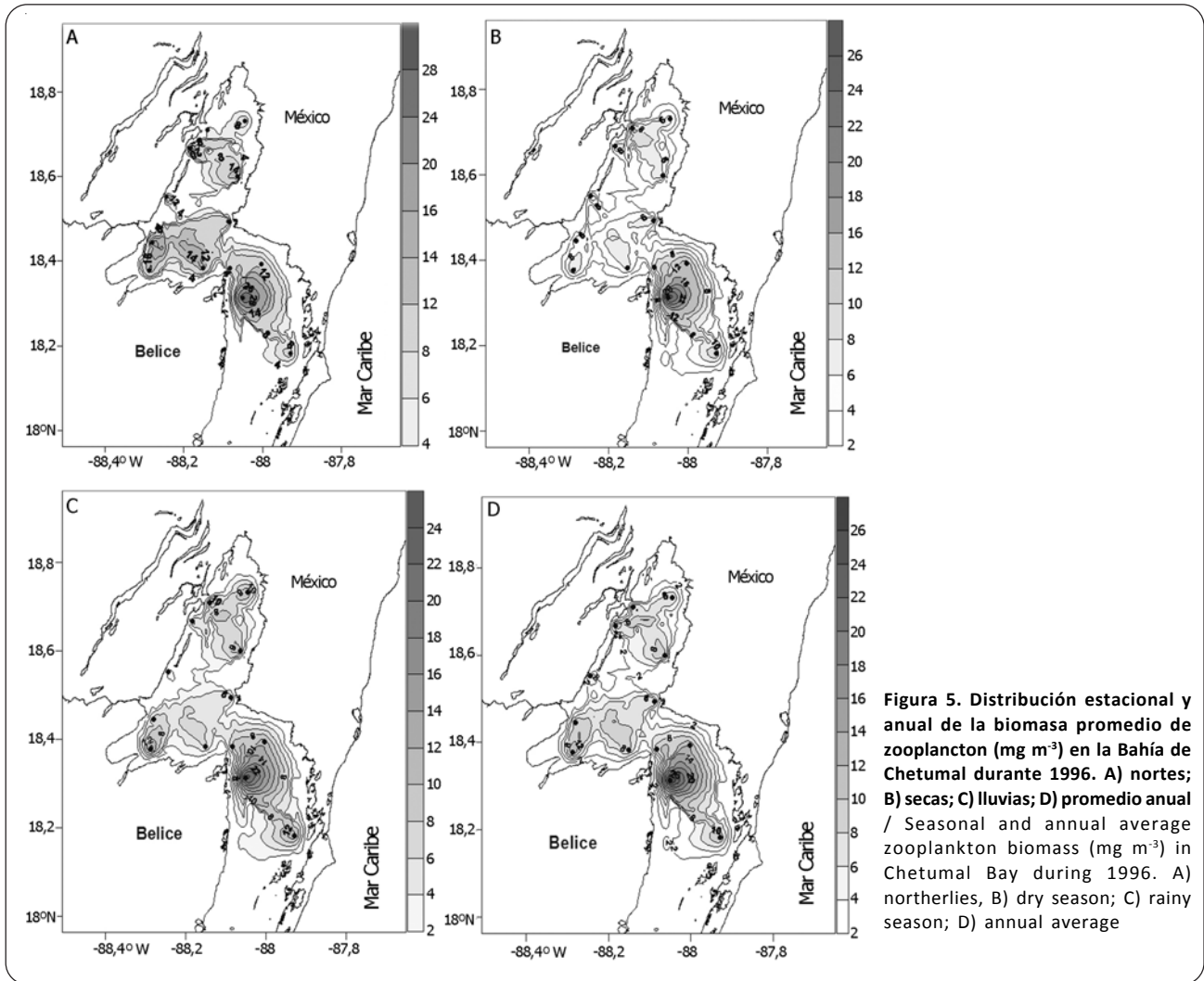


Figura 5. Distribución estacional y anual de la biomasa promedio de zooplankton (mg m^{-3}) en la Bahía de Chetumal durante 1996. A) nortes; B) secas; C) lluvias; D) promedio anual / Seasonal and annual average zooplankton biomass (mg m^{-3}) in Chetumal Bay during 1996. A) northerlies, B) dry season; C) rainy season; D) annual average

secas: 55,6%; lluvias: 46%; nortes: 51,3%. En ese año las estaciones 10 y 12 mostraron los mayores valores de biomasa ($F_{(12,65)} = 2,02, P = 0,036$) (Fig. 4B). La distribución estacional y anual de las biomazas durante 1997 se presenta en la Fig. 6A-D.

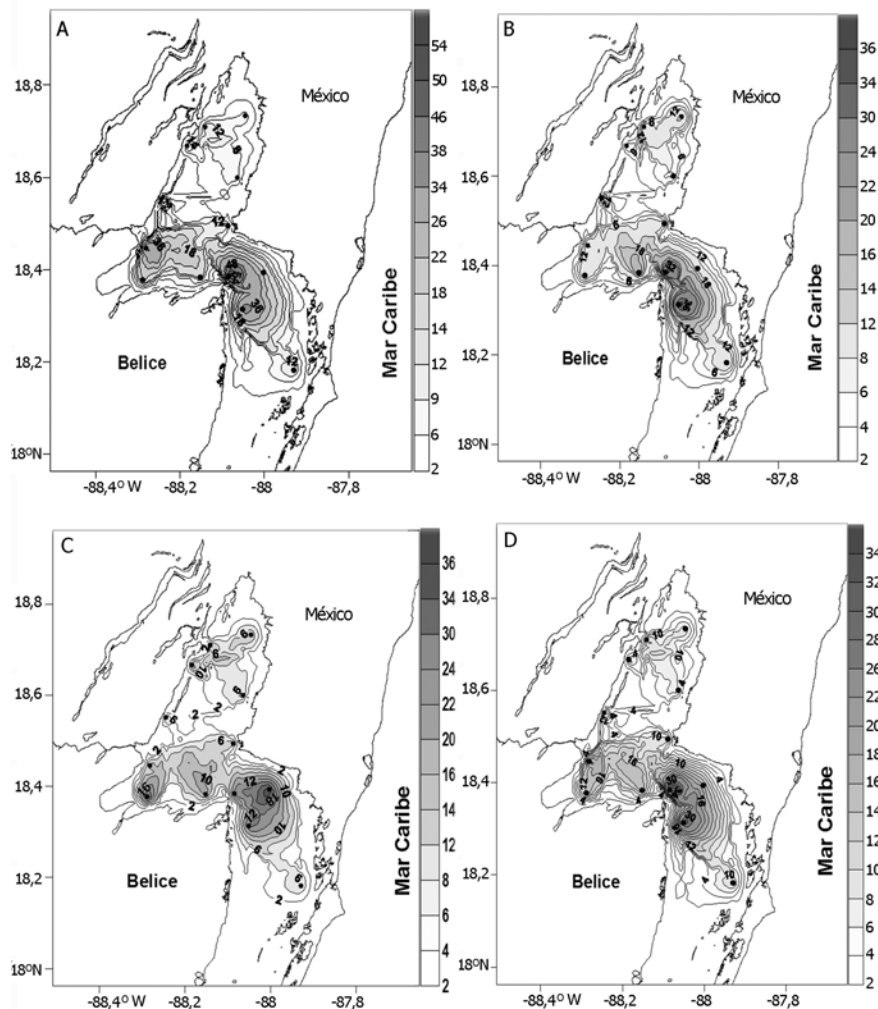
Al evaluar la correlación de temperatura y salinidad con la biomasa, se encontró que en 1996 los valores de biomasa no fueron significativamente distintos en función de la temperatura ($F = 1,09, P = 0,384$) (Fig. 4C), pero sí en relación con la salinidad, pues la biomasa fue distinta a 10 que la asociada a valores de 17 y 20 ($F = 2,54, P = 0,006$) (Fig. 4E). En 1997, la biomasa fue significativamente mayor a 28°C que a $31\text{-}32^{\circ}\text{C}$ ($F = 1,98, P = 0,061$) (Fig. 4D) y en cuanto a la salinidad, los valores de biomasa fueron menores a 15-16 que a 18-19 ($F = 2,03, P = 0,032$) (Fig. 4F).

DISCUSIÓN

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Las particulares características fisiográficas de la Bahía de Chetumal como son su gran extensión, su débil conexión oceánica y la poca profundidad de los canales de entrada y salida de agua, ocasionan que este sistema difiera notablemente tanto en variables físicas y químicas, como de biomasa zooplanctónica respecto a otros sistemas costeros del estado (Gasca *et al.* 1994a,b). La mayor diferencia fisiográfica se relaciona con la presencia de una extensión insular de la costa que obstruye el frente de la boca de la bahía, que queda orientada casi de manera perpendicular a la línea costera. En sistemas adyacentes como las bahías de Ascensión y Espíritu Santo, la boca

Figura 6. Distribución estacional y anual de la biomasa de zooplancton (mg m^{-3}) en la Bahía de Chetumal durante 1997. A) nortes; B) secas; C) lluvias; D) promedio anual / Seasonal and annual average zooplankton biomass (mg m^{-3}) in Chetumal Bay during 1997. A) northerlies, B) dry season; C) rainy season; D) annual average



es abierta y paralela al litoral, lo que favorece la influencia oceánica. Carrillo *et al.* (2009) destacaron a la salinidad como una de las principales fuentes de variabilidad hidrográfica en la bahía de Chetumal. Los valores generales de salinidad y su variación anual (1996 y 1997) en el área de estudio coinciden con los intervalos determinados por Carrillo *et al.* (2009), aunque se encontraron valores superiores a los 20 e inferiores a los 6 (Fig. 2C). Carrillo *et al.* (2009) destacan que las mínimas salinidades se asocian con la desembocadura del Río Hondo y las máximas en la zona de la boca de la bahía, lo que coincide con el patrón registrado en ambos años estudiados.

Al ser un sistema tropical, en la bahía de Chetumal no se esperan cambios estacionales pronunciados en las

características físicas; este se ha considerado como un estuario relativamente homogéneo en la escala temporal (Herrera-Silveira *et al.* 2002). Durante este estudio la temperatura varió estacional y mensualmente en ambos años (Fig. 2B); los extremos de variación ocurrieron en nortes y lluvias pero la distribución espacial de los valores en los sitios de muestreo permanecieron uniformes en ambas escalas. La salinidad mostró una variación significativa a nivel espacial pues se sectorizan las localidades internas de menor salinidad (<11) y las de mayor salinidad (est. 9-13) (Fig. 2D). Es interesante destacar la variación interanual observada, que se caracterizó por presentar valores de temperatura y salinidad más elevados en 1997 respecto al año anterior. Este año (1997) tuvo la influencia de El Niño 1997-1998, que fue el más intenso registrado hasta ahora; este evento

provoca un calentamiento de las aguas del Pacífico Oriental, mismo que alcanza a afectar también las masas de agua superficiales del Atlántico Noroccidental, incluyendo el Mar Caribe (Saravanan & Chang 2000). Es posible que su influencia, activa a partir de julio de 1997 haya provocado que la época de nortes 1997 fuera ligeramente más cálida que en 1996 y por lo tanto casi indistinguible de secas y lluvias. En 1996, la biomasa durante la época de los nortes fue significativamente mayor que en los otros dos periodos climáticos. De acuerdo con los datos de Silva *et al.* (2003) en un estuario semi-cerrado de Brasil, los mayores cambios del zooplancton entre secas y lluvias están relacionados con los cambios en la salinidad y en la composición del zooplancton. En el caso de Chetumal, la diferencia de salinidad entre secas y lluvias no fue tan clara; sólo fueron distinguibles por los cambios en temperatura (Fig. 2B).

SALINIDAD Y TEMPERATURA VS BIOMASA

Según Esteves *et al.* (2008), la comunidad de zooplancton de los sistemas costero-estuarinos de poca profundidad tienden a ser afectados principalmente por los vientos y la salinidad. En el área de estudio, la variación de la salinidad mostró una influencia parcial en la distribución de los valores de biomasa; en 1996 los valores de biomasa asociados a salinidades entre 10-12 fueron significativamente menores a los de salinidades mayores (17 y 20). Algo similar ocurrió en 1997 pero con intervalos más altos: a 15 y 16 fueron menores que a 18 y 19. Estos datos, junto con la tendencia observada de que el 45-50% de la biomasa del zooplancton se concentra en las zonas externas de la bahía (est. 9-13), con mayor salinidad en ambos ciclos anuales, sugieren que hay un patrón que favorece mayores biomásas en esta zona de la bahía independientemente del periodo estacional o del año.

A partir de la distribución de dos especies de copépodos (*Acartia tonsa* y *A. lilljeborgii*) con preferencias salinas diferenciales en la bahía de Chetumal, Suárez-Morales (1994) observó que el gradiente salino tiene influencia en la distribución local de algunos grupos del zooplancton y ello se refleja en el patrón espacial de la biomasa. Estos gradientes locales podrían estar complementados con otros factores físicos como las mareas, tal como se ha observado en otros sistemas estuarino-costeros tropicales (Álvarez-Cadena & Cortés-Altamirano 1990, Escamilla *et al.* 2001). En estos casos la fase llenante del ciclo mareal favorece el ingreso de formas costeras que acompaña a un incremento local de la

salinidad; en vaciante, los mismos sectores son dominados por formas residentes tolerantes a bajas salinidades. En Chetumal, con un patrón de mareas mixto con dominancia de semidiurnas, este efecto pudiera complementar a esta escala el patrón general de distribución de la biomasa del zooplancton observado respecto al gradiente de salinidad, con mayores biomásas en zonas más salinas.

En los años 1996 y 1997 los valores de biomasa mostraron cambios interanuales y estacionales significativos. También se encontraron variaciones importantes entre los meses, incluso en la misma época. Esto sugiere que pueden estar sucediendo cambios a escalas menores a la estacional o interanual, lo que requerirá esfuerzos adicionales para revelar estos cambios en este interesante sistema estuarino. De acuerdo con los análisis efectuados, los factores que explicaron las variaciones de biomasa observadas en la Bahía de Chetumal durante este estudio fueron la estación de muestreo (por la salinidad implícita), el mes y el año.

PRODUCTIVIDAD, DISTRIBUCIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO

En distintos sistemas estuarinos el aporte de aguas continentales y sus nutrientes provocan una mayor productividad primaria que se refleja en incrementos en la biomasa del zooplancton (Froneman 2002). En un estudio bianual (2000 y 2006) acerca de la productividad primaria de la bahía, Herrera-Silveira *et al.* (2009) demostraron que la mayor parte de este sistema estuarino muestra una baja productividad (oligotrófico-mesotrófico). Estos autores determinaron que solamente la zona cercana a la boca del Río Hondo avanza hacia un estado mesotrófico por efecto de los aportes residuales de las zonas urbanas y agrícolas aledañas. Encuentran los valores más altos de clorofila *a* y de producción primaria en las zonas más cercanas a la desembocadura del Río Hondo. En este mismo sector (est. 1, 7, 8) se obtuvieron promedios de biomasa de zooplancton bajos a intermedios en ambos años (Figs. 4A, B), pero no fueron los más elevados como cabría esperar a partir de la distribución de la producción primaria en la bahía (Herrera-Silveira *et al.* 2009). Así, el efecto de esta alta producción primaria no se refleja en la distribución local de la biomasa del zooplancton. Se especula que esta biomasa local de fitoplancton en la zona más interna no puede ser aprovechada por los copépodos, que son los herbívoros más abundantes del zooplancton de Chetumal (Suárez-Morales & Gasca 1994). Las dos especies dominantes, *Acartia tonsa* y *A. lilljeborgii* tienen intervalos de

tolerancia salina que raramente alcanzan niveles inferiores a las 10; en el caso de la primera especie que es la más tolerante a cambios salinos, los niveles óptimos fluctúan entre 15 y 22 (Cervetto *et al.* 1999). Es por ello que ambas especies quedan marginadas de esta fuente alimenticia y esta producción primaria no es aprovechada por el zooplancton residente. Así, los bajos valores de biomasa de zooplancton hacia la parte interna de la bahía (zonas I y III de Herrera-Silveira *et al.* 2009), parecen estar relacionados con el gradiente salino local que implica una menor influencia marina, lo que concuerda con lo reportado por Gómez-Aguirre (1987) para un sistema costero adyacente del Golfo de México. Otra posibilidad es que las condiciones hipóxicas asociadas a la eutrofización local provocada por los residuos agrícolas en la zona más interna de la bahía (Isaza *et al.* 2006), limiten la presencia y el pastoreo de los copépodos. La ausencia o escasez de copépodos y en general un decremento en la biomasa del zooplancton son consecuencia de las condiciones hipóxicas en sistemas costeros (Marcus 2001).

Los valores consistentemente altos de biomasa de zooplancton observados en la región sureste de la bahía, que corresponde a la región II de Herrera-Silveira *et al.* (2009), sugieren que este sector tiene la mayor producción secundaria del sistema. Durante ambos ciclos anuales cerca de la mitad de la biomasa total de la bahía se concentró en este sector (est. 9-13) (Figs. 4, 5). Esta zona recibe la influencia del frente marino, lo que tendría dos efectos: 1) transporte de organismos que en esta zona mixta encuentran condiciones adecuadas para su desarrollo, y 2) posiblemente un aporte de nutrientes exógenos que pueden ser aprovechados por las poblaciones residentes. La distribución de la abundancia de los copépodos coincide con este patrón; las mayores abundancias ocurren en las zonas cercanas al reducido frente oceánico (Suárez-Morales & Gasca 1994), al igual que ocurre en otros estuarios (Gonçalves *et al.* 2012). La distribución de las medusas se comporta de la misma manera, más del 90% de los individuos ocurrieron en las estaciones 10-13, las más cercanas al frente marino del sistema (Suárez-Morales *et al.* 1995). En otros sistemas estuarinos semi-aislados y oligotróficos se ha encontrado que la productividad del fitoplancton en la columna de agua es baja y que no podría sostener una producción del zooplancton (Perissinotto *et al.* 2000); por ello, se considera que es posible que las concentraciones relativamente bajas de clorofila en la mayor parte de Chetumal sean compensadas con otras fuentes de alimento como detritus y protozoarios.

De acuerdo con los patrones tradicionales, los sistemas costeros y estuarinos exportan su exceso de producción a las áreas oceánicas adyacentes mediante procesos hidrológicos como los flujos de mareas (Esteves *et al.* 2008). En un estuario parcialmente aislado similar al de la bahía de Chetumal, Melo-Junior *et al.* (2007) no encontraron diferencias entre la importación y la exportación de biomasa del zooplancton entre el sistema y las aguas adyacentes. La baja variabilidad estacional e interanual de la productividad primaria (Herrera-Silveira *et al.* 2009) y de la biomasa del zooplancton observada en este estudio parecen indicar que existe un equilibrio entre importación y exportación de materia orgánica en este sistema, posiblemente asociado con una baja energía interna y con el débil régimen de mareas, un factor clave en estos procesos (Lee 1990, 1995).

Los valores mensuales de biomasa zooplanctónica registrados en Chetumal durante este estudio son del orden de 8,99 a 31,78 mg m⁻³, que en general están dentro del intervalo reportado previamente (1-25 mg m⁻³) (Gasca & Castellanos 1993). Estos valores son notablemente inferiores a los estimados en sistemas costeros adyacentes (Suárez-Morales & Gasca 1994: 25 a 125 mg m⁻³) y lo son también respecto a zonas costeras y arrecifales de la costa caribeña de México (Castellanos & Suárez-Morales 1997: 14,79-143,26 mg m⁻³; Álvarez-Cadena *et al.* 2007: 34-75 mg m⁻³). En otros sistemas estuarinos neotropicales los valores promedio son mucho más elevados, del orden de los 100-350 mg m⁻³ (Melo Junior *et al.* 2007). De acuerdo a lo apuntado por Esteves *et al.* (2008) para sistemas estuarinos, las bajas biomásas de zooplancton registradas en Chetumal se explican en parte por el reducido tamaño de los organismos dominantes encontrados en el zooplancton residente, en este caso los copépodos del género *Acartia* (con una longitud cercana a 1 mm).

Los reducidos valores de biomasa mensual, estacional y anual a lo largo de este estudio (Fig. 3 A-D), indican que la bahía es poco productiva durante todo el año, independientemente de la escala de muestreo. A pesar de que la bahía recibe continuos aportes de aguas continentales y nutrientes terrígenos, particularmente en la época de lluvias, su efecto se percibe débilmente en la biomasa del zooplancton. Es durante la época de lluvias cuando se observaron las menores biomásas de zooplancton en ambos periodos anuales (Figs. 3 C, D). La disminución de la biomasa de zooplancton durante la época de lluvias ha sido observada también en sistemas lagunares del Caribe mexicano (Álvarez-Cadena *et al.*

2007) y de la India (Sarkar *et al.* 1986). Los resultados de Herrera-Silveira *et al.* (2009) muestran que la mayor producción primaria en Chetumal se presenta en el periodo de lluvias; sin embargo, esto ocurre en la zona más interna, de menor salinidad, donde los herbívoros dominantes, *Acartia tonsa* y *A. lilljeborgii* no pueden desarrollarse. Así, este patrón puede estar relacionado con el lento reciclamiento del agua (Lankford 1977), la disminución de la salinidad y la baja accesibilidad de nutrientes terrígenos.

En un estuario templado, Froneman (2002) observó que la biomasa de zooplancton muestra variaciones estacionales muy claras y que está significativamente correlacionada con cambios en la clorofila *a*. Como sucede en sistemas tropicales, en Chetumal no se esperaban cambios estacionales pronunciados en la biomasa; sólo en el caso de nortes en 1996 se observaron cambios significativos en biomasa, pero no fue así en 1997. La débil estacionalidad de la biomasa observada en 1996 pudo haber sido provocada por la influencia del calentamiento asociado con El Niño (Saravanan & Chang 2000).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todas las personas que nos apoyaron en las tareas asociadas con la preparación de los viajes de muestreo y la recolección de las muestras de zooplancton en la Bahía de Chetumal durante 1996-1997. En particular recibimos el apoyo de Rosa Ma. Hernández, César Quintal, Concepción Curiel Mondragón y Soledad Jiménez. Este proyecto fue realizado con el financiamiento del proyecto Zooplancton de El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR).

LITERATURA CITADA

- Álvarez-Cadena JN & R Cortés-Altamirano. 1990. Algunos factores físicos y biológicos que afectan las poblaciones naturales de *Acartia tonsa* y *A. lilljeborgii* (Copepoda: Acartiidae) en el estero de Urías, Sinaloa, México. *Investigaciones Marinas CICIMAR* 5: 69-77.
- Álvarez-Cadena JN, U Ordóñez-López, D Valdés, AR Almaral-Mendivil & A Uicab-Sabido. 2007. Estudio anual del zooplancton: composición, abundancia, biomasa e hidrología del norte de Quintana Roo, Mar Caribe de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 78: 421-430.
- Baduini CL. 1997. Spatial and temporal patterns of zooplankton biomass in Monterrey Bay, California, during the 1991-1993 El Niño, and an assessment of the sampling design. *CalCOFI Reports* 38: 193-197.

- Beers JR. 1981. Determinación de la biomasa del zooplancton. En: Boltovskoy D (ed). *Atlas del zooplancton del Atlántico Sudoccidental y métodos de trabajo con el zooplancton marino*, pp. 133-141. Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero, INIDEP, Mar del Plata.
- Carrillo L, E Palacios-Hernández, AM Ramírez & B Morales-Vela. 2009. Características hidrometeorológicas y batimétricas. En: Espinoza-Avalos J, GA Islebe & HA Hernández-Arana (eds). *El sistema ecológico de la bahía de Chetumal / Corozal: costa occidental del Mar Caribe*, pp. 12-20. ECOSUR, Chetumal.
- Castellanos I & E Suárez-Morales. 1997. Observaciones sobre el zooplancton de la zona arrecifal de Mahahual, Quintana Roo (Mar Caribe mexicano). *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Zoológica* 68: 237-252.
- Cervetto G, R Gaudy & M Pagano. 1999. Influence of salinity on the distribution of *Acartia tonsa* (Copepoda, Calanoida). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 239: 33-45.
- Escamilla JB, E Suárez-Morales & R Gasca. 2011. Distribución del zooplancton durante flujos de marea opuestos en el complejo lagunar de Chelem, Yucatán, México. *Revista de Biología Tropical* 49(1): 47-51.
- Esteves FA, A Caliman, JM Santangelo, RD Guariento, VF Farjalla & RL Bozelli. 2008. Neotropical coastal lagoons: An appraisal of their biodiversity, functioning, threats and conservation management. *Brazilian Journal of Biology* 68(4): 967-981.
- Froneman PW. 2002. Response of the plankton to three different hydrological phases of the temporarily open/closed Kasouga Estuary, South Africa. *Estuarine, Coastal & Shelf Science* 55: 535-546.
- Gasca R & I Castellanos. 1993. Zooplancton de la Bahía de Chetumal, Mar Caribe, México. *Revista de Biología Tropical* 41(3): 619-625.
- Gasca R, I Castellanos & E Suárez-Morales. 1994a. Análisis preliminar y perspectivas de una comunidad ecológica fronteriza: El zooplancton de la Bahía de Chetumal. En: Suárez-Morales E (ed). *Estudio integral de la frontera México-Belice. Tomo IV: Recursos Naturales*, pp. 119-142. Centro de Investigaciones de Quintana Roo (CIQRO), México.
- Gasca R, E Suárez-Morales & L Vásquez-Yeomans. 1994b. Estudio comparativo del zooplancton (biomasa y composición) en dos bahías del Mar Caribe mexicano. *Revista de Biología Tropical* 42(3): 595-604.
- Gómez-Aguirre S. 1987. Biomasa del plancton de la zona económica exclusiva del sureste del Golfo de México y Caribe mexicano (May-Jul. 1982). *Universidad y Ciencia* 4: 47-53.

- Gonçalves AMM, MA Pardal, SC Marques, S Mendes, MJ Fernández-Gómez, MP Galindo-Villardón & UM Azeiteiro. 2012.** Responses of Copepoda life-history stages to climatic variability in a Southern-European temperate estuary. *Zoological Studies* 51(3): 321-335.
- Herrera-Silveira JA, A Jiménez-Zaldívar, M Aguayo, J Trejo, I Medina, F Tapia-González, I Medina-Gómez & O Vázquez. 2002.** Calidad de agua de la Bahía de Chetumal a través de indicadores de su estado trófico. En: Rosado-May FJ, R Romero-Mayo & A De Jesús (eds). *Contribuciones de la ciencia al manejo costero integrado de la Bahía de Chetumal y su área de influencia*, pp. 185-196. Universidad de Quintana Roo, México.
- Herrera-Silveira J, JA Arreola-Lizárraga & J Ramírez. 2009.** Cambios hidrológicos y de estado trófico entre los años 2000 y 2006. En: Espinoza-Avalos J, GA Islebe & HA Hernández-Arana (eds). *El sistema ecológico de la bahía de Chetumal / Corozal: costa occidental del Mar Caribe*, pp. 21-27. ECOSUR, Chetumal.
- Isaza CFA, PC Sierra-Correa, M Bernal-Velasquez, LM Londoño & W Troncoso. 2006.** Global International Waters Assessment, Caribbean Sea/Colombia & Venezuela, Central America & Mexico, GIWA Regional Assessment 3b, 3c., 96 pp. University of Kalmar, Kalmar. <http://www.unep.org/dewa/giwa/areas/reports/r3bc/giwa_regional_assessment_3bc.pdf>
- Jiang S, TD Dickey, DK Steinberg & LP Madin. 2007.** Temporal variability of zooplankton biomass from ADCP backscatter time series data at the Bermuda Testbed Mooring site. *Deep Sea Research I* 54: 608-636.
- Lankford RR. 1977.** Coastal lagoons of Mexico. Their origins and classification. In: Wiley M (ed). *Estuarine processes*, pp. 182-215. Academic Press, New York.
- Lee SY. 1990.** Primary productivity and particulate organic matter flow in an estuarine mangrove-wetland in Hong Kong. *Marine Biology* 106: 453-463.
- Lee SY. 1995.** Mangrove outwelling: a review. *Hydrobiologia* 295: 203-212.
- Mann KH & JRN Lazier. 2006.** Dynamics of marine ecosystems: biological-physical interactions in the oceans, 496 pp. Blackwell Publishing, Boston.
- Marcus NH. 2001.** Zooplankton: responses to and consequences of hypoxia. En: Rabalais NN & E Turner (eds). *Coastal hypoxia: consequences for living resources and ecosystems*, pp. 49-60. American Geophysical Union, Coastal and Estuarine Studies, Washington DC.
- Marques SC, UM Azeiteiro, JC Marques, J Neto & MA Pardal. 2006.** Zooplankton and ichthyoplankton communities in a temperate estuary: spatial and temporal patterns. *Journal of Plankton Research* 28: 297-312.
- Mclusky DS & M Elliott. 2004.** The estuarine ecosystem: ecology, threats and management, 216 pp. Oxford University Press, New York.
- Melo-Junior M de, M Nogueira, R Schwamborn, S Neumann-Leitão & W Ekau. 2007.** Fluxes of zooplankton biomass between a tidal estuary and the sea in Northeastern Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography* 55: 239-249.
- Perissinotto R, DR Walker, P Webb, TH Wooldridge & R Bally. 2000.** Relationships between zoo- and phytoplankton in a warm-temperate, semi-permanently closed estuary, South Africa. *Estuarine, Coastal & Shelf Science* 51: 1-11.
- Postel L, H Fock & W Hagen. 2000.** Biomass and abundance. In: Harris R, P Wiebe, J Lenz, HR Skjoldal & M Huntley (eds). *ICES zooplankton methodology manual*, pp. 89-132. Academic Press, London.
- Saravanan R & P Chang. 2000.** Interaction between Tropical Atlantic variability and El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Climate* 13: 2177-2194.
- Sarkar SK, BN Singh & A Choudhury. 1986.** Composition and variations in the abundance of zooplankton in the Hooghly estuary, West Bengal, India. *Proceedings of the Indian Academy of Science, Animal Sciences* 95: 125-134.
- Silva TA, S Neumann-Leitão, R Schwamborn, LO Gusmão & DA Nascimento-Vieira. 2003.** Diel and seasonal changes in the macrozooplankton community of a tropical estuary in Northeastern Brazil. *Revista Brasileira de Zoologia* 20: 439-446.
- Sokal RR & FJ Rohlf. 1998.** Biometry: the principles and practice of statistics in biological research, 850 pp. W. H. Freeman & Company, New York.
- Suárez-Morales E. 1994.** Copépodos pláncnicos de la Bahía de Chetumal, México (1990-1991). *Caribbean Journal of Science* 30(3-4): 181-188.
- Suárez-Morales E & R Gasca. 1994.** Zooplankton biomass fluctuations in a Mexican Caribbean Bay (Bahía de la Ascensión) during a year cycle. *Caribbean Journal of Science* 38(1-2): 116-123.
- Suárez-Morales E, L Segura-Puertas & R Gasca. 1995.** Medusas (Cnidaria: Hydrozoa) de la Bahía de Chetumal, Quintana Roo, México (1990-1991). *Caribbean Journal of Science* 31(3-4): 243-251.
- Vásquez-Yeomans L & AM González. 1994.** Ictioplancton de la Bahía de Chetumal. En: Suárez-Morales E (ed). *Estudio integral de la frontera México-Belice. Recursos Naturales*, pp. 133-142. Centro de Investigaciones de Quintana Roo, México.

Recibido el 12 de octubre de 2011 y aceptado el 17 de mayo de 2012

Editor Asociado: Mauricio Landaeta D.