



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Desarrollo Sustentable

**Aspectos ecológicos de copépodos cyclopoides en
cuerpos de agua de Matehuala, San Luis Potosí,
México**

TESIS

**Que para obtener el grado de
LICENCIADO EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES**

Presenta

Br. José Luis Uc Castillo

Directora de Tesis

Dra. Nadia V. Martínez-Villegas

Cozumel, Q. Roo, junio de 2018.

UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias y Humanidades



Tesis elaborada bajo la supervisión del comité de Tesis del programa de Licenciatura y aprobada como requisito para obtener el grado de:

LICENCIADO EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

COMITÉ DE TESIS

UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
UNIDAD ACADÉMICA COZUMEL

Directora: _____

Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas



Asesor: _____

Dr. Adrián Cervantes Martínez

Asesor: _____

Dra. Martha Angélica Gutiérrez Aguirre



Cozumel, Quintana Roo, México, junio de 2018

DEDICATORIA

A mis padres, Mirle L. Castillo Baeza y Luis A. Uc Maza, quienes me acompañaron y apoyaron incansablemente a lo largo de cinco años en la licenciatura. Ustedes fueron quienes me brindaron la educación que me ha convertido en lo que soy. Este trabajo es el fruto de todo su esfuerzo y sacrificio a lo largo de este camino.

A mi familia, tíos, primos, abuelos, quienes a pesar de estar separados por la distancia siempre me han brindado sus muestras de afecto y confianza y han creído en mí.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a mis padres por haberme brindado el cariño, apoyo moral y económico durante esta etapa de mi vida. Por educarme como lo hicieron y por impulsarme a superarme día a día sin importar la situación.

Al Dr. Adrián Cervantes-Martínez y a la Dra. Martha Gutiérrez-Aguirre, por invertir su valioso tiempo y su confianza en mí para la realización de este trabajo, y por asesorarme y resolver todas mis dudas en este sentido.

A la Dra. Nadia Martínez-Villegas, por abrirme las puertas para poder trabajar en colaboración con usted y con el IPICYT. A Jazz Mendoza-Chávez, por todo el apoyo cuando llegué a San Luis Potosí, por el hospedaje, los consejos, por siempre estar ahí cuando tenía alguna duda. Al IPICYT por la beca otorgada de apoyo único (CH-22478 Becas Apoyo Unico 2a Quin Mayo 2018) para la realización de esta tesis.

A mis compañeras de toda la licenciatura, Enoé y Lulú, por hacerse cargo de mí durante cinco años, por cuidarme y estar conmigo en los momentos

buenos y malos. A Saúl, por ser mi amigo, por estar ahí en todo momento y por compartir momentos especiales a mi lado. A ti, Esme, por el cariño y el apoyo que me has brindado en este tiempo.

Finalmente, a todos los profesores de la UQROO que en algún momento me impartieron clase, gracias por transmitirme sus conocimientos y por sus palabras, algo aprendí de cada uno de ustedes.

Gracias a todos..

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN	10
ANTECEDENTES	14
JUSTIFICACIÓN.....	17
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
OBJETIVO	19
OBJETIVOS PARTICULARES.....	19
ÁREA DE ESTUDIO	20
Localización	20
Geología y edafología	20
Hidrología	21
Climatología	21
Vegetación.....	22
MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
Campaña de muestreo	24
Abundancia	24
Riqueza	24
Tallas	24
Proporción hembras-machos	25
Parámetros físicos-químicos	25
Determinación de arsénico en muestras de agua	25
Custodia de las muestras	26
RESULTADOS	27
Riqueza específica (S) y respectiva abundancia por sitios.....	27
Abundancia total de copépodos cyclopoides.....	28
Abundancia por estadios (machos, hembras, copepoditos y nauplios).....	29
Tallas	31
<i>Estructura de tallas en época de lluvia.....</i>	<i>31</i>
<i>Estructura de tallas en época de fría</i>	<i>33</i>
<i>Estructura de tallas en época de seca.....</i>	<i>36</i>
Proporción hembras-machos	37
<i>Proporción hembras-machos en época de lluvia.....</i>	<i>37</i>
<i>Proporción hembras-machos en época de fría</i>	<i>38</i>
<i>Proporción hembras-machos en época de Seca</i>	<i>39</i>
<i>Temperatura ambiente</i>	<i>40</i>
<i>Temperatura del agua</i>	<i>41</i>
<i>Oxígeno disuelto</i>	<i>42</i>
<i>Conductividad y salinidad</i>	<i>43</i>

<i>pH</i>	45
<i>Arsénico</i>	46
DISCUSIÓN	47
Riqueza específica.....	47
Abundancia de copéodos.....	48
Tallas y proporción hembras-machos	50
Parámetros físicos y químicos	52
CONCLUSIONES	56
LITERATURA CITADA	58
ANEXOS	68
Anexo 1	68
Anexo 2	69
Anexo 3	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Morfología general de los copépodos dulceacuícolas.....	12
Figura 2. Ubicación del municipio de Matehuala, San Luis Potosí.....	20
Figura 3. Localización de los sitios de muestreo en Matehuala, San Luis Potosí	23
Figura 4. Abundancia total de individuos pertenecientes a la Subclase Copepoda: Orden Cyclopoida durante el estudio	28
Figura 5. Abundancias de copépodos por grupo en época de lluvia, fría y seca.....	30
Figura 6. Frecuencia relativa de tallas de copépodos hembra de la especie <i>Paracyclops chiltoni</i> en el sitio Club de Tiro	31
Figura 8. Frecuencia relativa de tallas de copépodos hembra de la especie <i>Paracyclops chiltoni</i> en el sitio Club de Tiro	33
Figura 9. Frecuencia relativa de tallas de copépodos macho de la especie <i>Paracyclops chiltoni</i> en el sitio Club de Tiro.....	34
Figura 11. Frecuencia relativa de tallas de copépodos macho de la especie <i>Acanthocyclops americanus</i> en el sitio Laguna	35
Figura 12. Frecuencia relativa de tallas de copépodos hembra de la especie <i>Eucyclops chihuahuensis</i> en el sitio Laguna.....	36
Figura 13. Proporción hembras-machos de la especie <i>Paracyclops chiltoni</i> en el sitio Club de Tiro en época de lluvia	37
Figura 14. Proporción hembras-machos de la especie <i>Paracyclops chiltoni</i> en el sitio Club de Tiro en época de fría	38
Figura 15. Proporción hembras-machos de la especie <i>Acanthocyclops americanus</i> en el sitio Laguna en época de fría.....	38
Figura 16. Proporción hembras-machos de la especie <i>Paracyclops chiltoni</i> en el sitio Club de Tiro en época de seca.....	39
Figura 17. Proporción hembras-machos de copépodos adultos en el sitio Laguna en época de seca.....	39
Figura 19. Comportamiento de la temperatura del agua en cada sitio durante el periodo de estudio	41
Figura 20. Comportamiento de la concentración de oxígeno disuelto (mg/L) en cada sitio durante el periodo de estudio.....	42
Figura 21. Comportamiento de la conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}^3$) en cada sitio durante el periodo de estudio.....	43
Figura 22. Comportamiento de la salinidad en cada sitio durante el periodo de estudio	44
Figura 23. Comportamiento del pH en cada sitio durante el periodo de estudio	45

Figura 24. Comportamiento de la concentración de arsénico (mg/L) en cada sitio durante el periodo de estudio	46
--	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clima estacional de la ciudad de San Luis Potosí.....	21
Tabla 2. Concentraciones promedio de arsénico en los sitios de muestreo.....	23
Tabla 3. Especies de copépodos registradas y abundancias en los sitios	27
Tabla 4. Temperatura media mensual (°C) en Matehuala, San Luis Potosí durante 1979-2011	68
Tabla 5. Precipitación mensual (mm) en Matehuala, San Luis Potosí durante 1979- 2011	69

RESUMEN

Los copépodos son microcrustáceos con capacidad de vivir en cualquier ambiente con humedad y, dada su gran sensibilidad, su pequeño tamaño y sus cortos periodos generacionales, son de los grupos con mayor relevancia y practicidad para estudios experimentales de impacto ambiental, permitiendo no solo evaluar los efectos directos, sino también el impacto indirecto de los contaminantes o estresores ambientales. Esos impactos que generan los contaminantes pueden inducir cambios en la estructura de las comunidades de estos organismos. En este trabajo se evaluó la abundancia, riqueza de especies, estadios, tallas y sexos en copépodos cyclopoides así como la variación físico-química: oxígeno disuelto (mg/l), temperatura (°C), conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}^3$), pH y salinidad (psu) de cuerpos de agua con y sin contaminación con arsénico en Matehuala, San Luis Potosí durante tres épocas climáticas drásticas (secas, lluvias y frías). Dicha temporalidad se obtuvo a partir de historiales climáticos de temperatura ambiental y precipitación. Los sitios estudiados son representativos de sistemas acuáticos con alta (Club de Tiro), media (Laguna) y nula (Presita) contaminación con arsénico. Los resultados obtenidos mostraron la presencia de las especies *Acanthocyclops americanus* y *Eucyclops chihuahuensis* en el sitio Laguna con concentraciones de arsénico de 4-5.3 mg/l. *A. americanus* se registró durante la época de fría y seca, con una abundancia de 0.79 y 1.73 ind/l respectivamente, mientras que *E. chihuahuensis* se encontró únicamente durante secas con una abundancia de 0.35 ind/l. *Paracyclops chiltoni* se registró en el sitio Club de Tiro en concentraciones de arsénico entre 53.2-62.6 mg/l durante las tres épocas estudiadas, la abundancia más alta se presentó durante secas con 25.17 ind/l, siendo las hembras las dominantes. En el caso del sitio Presita no se encontraron especies de copépodos durante este estudio. A lo largo del estudio las tallas de *P. chiltoni* parecieron constantes, mientras que se encontraron variaciones en las tallas de las especies *A. americanus* y *E. chihuahuensis*, probablemente factores como la temperatura y la disponibilidad de alimentos explican este comportamiento. La máxima temperatura del agua reportada fue de 28.8 °C en Laguna mientras que la mínima fue de 13.6 °C en Presita. La conductividad eléctrica fue de 2345- 3475 $\mu\text{S}/\text{cm}^3$ y por su salinidad los sistemas se clasificaron como oligohalinos. Para el pH, la mayoría de los valores obtenidos son principalmente cercanos a la neutralidad y ligeramente básicos en Laguna y Presita, mientras que en Club de Tiro son ligeramente ácidos. La concentración de oxígeno disuelto más alta se reportó en la época fría con 15.8 mg/l en Presita mientras la más

baja se encontró en seca con 0.6 mg/l en Club de Tiro. Las concentraciones de arsénico variaron desde <0.01 mg/l hasta 62.6 mg/l. Este estudio contribuye al conocimiento escaso sobre la ecología de estos organismos en la región centro-norte del país, por lo que es necesario continuar con los estudios para conocer más a detalle la evolución a largo plazo de los aspectos ecológicos de los copépodos y los factores físicos o biológicos que ejercen una influencia sobre estas especies.

Palabras clave: arsénico, contaminación del agua, climático, copépodos, parámetros ecológicos.

INTRODUCCIÓN

Los metales y metaloides constituyen componentes comunes de la litósfera, distribuyéndose tanto en reservorios abióticos como bióticos y formando parte de numerosos ciclos biológicos y geológicos naturales. Se dividen en esenciales y no esenciales, los esenciales cumplen con una función biológica definida y entre ellos se encuentran el cromo, cobalto, cobre, selenio, hierro, manganeso, molibdeno, níquel, vanadio y zinc; por otra parte, los no esenciales son aquellos sin una función biológica definida, comprendiendo el oro, plata, mercurio, plomo y arsénico (Gutiérrez y Gagneten, 2011; Duarte y Marini, 2017).

La presencia de estos elementos en los ecosistemas acuáticos es de manera natural; no obstante, las actividades antropogénicas han causado un incremento de las concentraciones normales en los cuerpos de agua epicontinentales (Gutiérrez y Gagneten, 2011). Todo lo anterior, representa un serio problema de contaminación del agua debido a las propiedades tóxicas de los metales y metaloides y a los efectos adversos que estos generen en su calidad (Baudouin y Scoppa, 1974).

Entre los metaloides, como se mencionó anteriormente, se encuentra el arsénico, clasificado como uno de los elementos químicos más tóxicos y carcinogénicos. El arsénico puede llegar al agua por vía natural (ascenso de fluidos magmáticos e hidrotermales, emisiones volcánicas a la atmósfera, desorción y disolución de minerales con arsénico durante la meteorización) y por vía antropogénica (minería, procesos metalúrgicos, combustión de combustibles fósiles, uso de plaguicidas y preservantes de la madera, arseniato de cobre y cromo) (Fernández-Turiel *et al.*, 2005).

Existen diversas especies de arsénico identificadas en el agua, en lo que se refiere a formas inorgánicas, en ambientes superficiales y cercanos a la superficie, el arsénico se presenta en dos estados de oxidación: arsénico trivalente As(III), llamado arsenito y arsénico pentavalente As(V), llamado arseniato. La toxicidad de los compuestos del arsénico varía considerablemente, los compuestos inorgánicos son generalmente más tóxicos que los compuestos orgánicos (Lara-Del Río, 2015; Mendoza-Chávez, 2016).

La contaminación de aguas (subterráneas y superficiales) por arsénico es una grave amenaza para la humanidad, ya que este elemento puede incorporarse fácilmente en la cadena alimenticia y favorecer su distribución, y dependiendo de las condiciones

físico-químicas del medio ambiente, algunos compuestos del arsénico se pueden solubilizar fácilmente en agua y, de ahí, ser tomados por los microorganismos, dando lugar a altos niveles de biodisponibilidad (Montoya *et al.*, 2015).

Gutiérrez y Gagneten (2011) mencionan que una de las principales medidas para actuar ante esta problemática es la evaluación de los efectos de esas sustancias sobre la biota que se encuentra en el ecosistema, y uno de los componentes clave es el zooplancton debido a que posee un rol central en las redes tróficas, y su elevada sensibilidad a los cambios físicos y químicos del medio los tornan adecuados para su utilización como bioindicadores de contaminación por metales.

El zooplancton está constituido por una amplia variedad de organismos, incluyendo los estadios de huevo, larva y juveniles de casi todas las taxas de la escala zoológica. Estos organismos viven suspendidos en la columna de agua y son transportados pasivamente por los movimientos de las masas de agua. Dentro del zooplancton se encuentra la subclase Copepoda H. Milne-Edwards, 1840, quienes son los encargados de aportar entre el 55-75% de la biomasa zooplanctónica (Ordoñez-López *et al.*, 2010).

Los copépodos son microcrustáceos con capacidad de vivir en cualquier ambiente con elevada humedad (Cervantes-Martínez y Gutiérrez-Aguirre, 2011); por lo tanto, es posible encontrarlos en el mar, lagos, lagunas, charcos (temporales y permanentes) e incluso en pequeñas gotas de agua contenidas entre plantas o partículas del suelo. Los factores que tienen influencia sobre los límites de distribución de estos organismos son semejantes a los que operan en el resto de las especies del planeta; por ejemplo, factores físicos y químicos del agua y del ambiente y factores biológicos como la competencia, depredación, sobrepoblación, etc.

Morfológicamente, como se observa en la figura 1, el cuerpo de los copépodos es alargado, delgado y segmentado, tienen la forma general de un crustáceo: presentan un área anterior donde se fusiona la región cefálica con el tórax, conocida como cefalotórax. En él se encuentran apéndices que les permiten detectar señales ambientales, moverse y comer (Cervantes-Martínez y Gutiérrez-Aguirre, 2011).

También presentan una región posterior conocida como abdomen, sin apéndices; es muy importante porque en ella albergan el sistema reproductor y, en la natación, apoya en el impulso y la dirección al organismo. Así mismo, es posible distinguir entre hembras y machos. Por lo general, las hembras son más grandes que los machos y

éstos últimos tienen las anténulas articuladas (geniculadas), mientras que en las hembras son rectas.

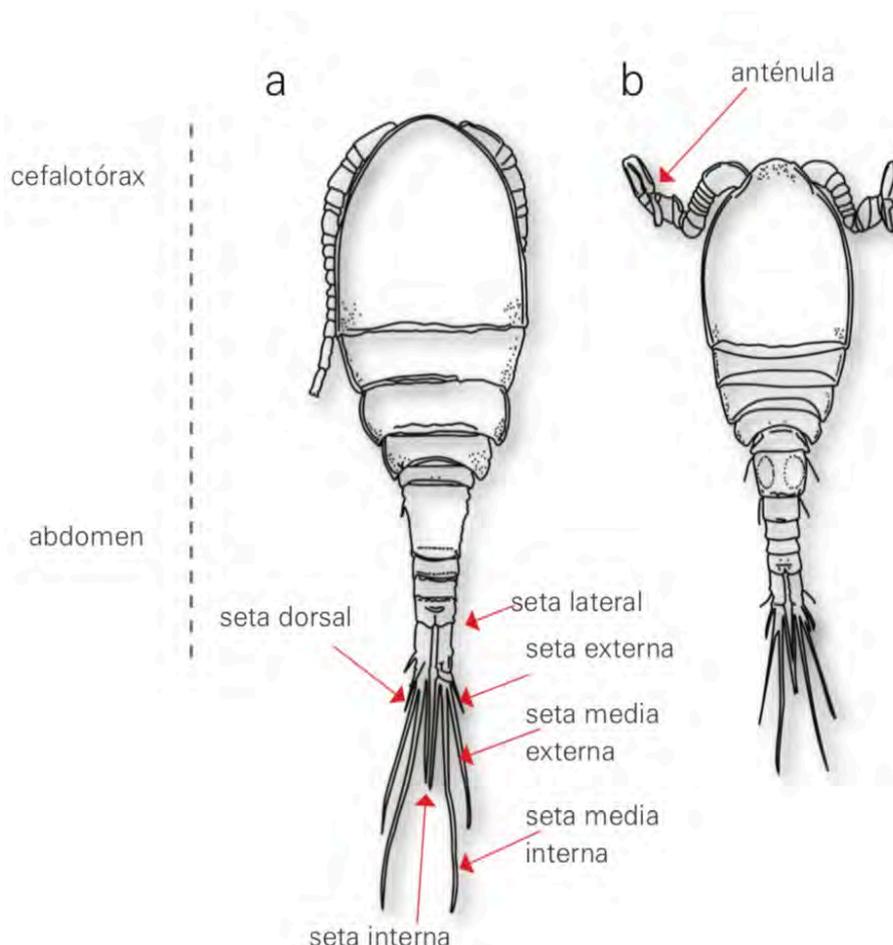


Figura 1. Morfología general de los copépodos dulceacuícolas, donde se aprecia la forma del cuerpo y partes que lo conforman: *a) hembra, b) macho*. Tomado de Cervantes-Martínez y Gutiérrez-Aguirre (2011).

De manera general, los copépodos viven en ambientes con alto grado de inestabilidad y probablemente su éxito se deba en parte a los mecanismos adaptativos (Gutiérrez-Aguirre *et al.*, 2006). Estos determinados mecanismos operan cuando las condiciones ambientales no son favorables; por ejemplo, determinadas especies tienen la capacidad de endurecer las cubiertas ováricas y los huevos permanecen en estado de vida latente hasta que las condiciones cambian y son favorables, normalmente estos huevos se depositan a unos 10 cm de sedimento donde pueden durar de tres a cuatro meses. (Fernández de Puellas, 2015).

Así mismo, se tiene la formación de quistes en Harpacticoida, y el estado de diapausa en Cyclopoida, siendo este último una interrupción que implica cambios metabólicos

en los organismos, conducentes a un detenimiento completo del desarrollo y con ello determinando la interrupción de la alimentación y la disminución en el consumo de oxígeno (Gagneten, 2005).

Dada su gran sensibilidad son de los grupos más usados para la realización de estudios ecotoxicológicos; además, su pequeño tamaño, cortos periodos generacionales y facilidad para cultivos le otorgan relevancia y practicidad para estudios experimentales de impacto ambiental, permitiendo no solo evaluar los efectos directos, sino también el impacto indirecto de los contaminantes o estresores ambientales (Gutiérrez y Gagneten, 2011).

Esos impactos que generan los contaminantes pueden inducir cambios en la estructura de las comunidades de los organismos; sin embargo, en sistemas altamente contaminados (por ejemplo, el sistema acuático conocido como Cerrito Blanco en Matehuala, San Luis Potosí) se desconoce si existe un efecto sobre la abundancia, tallas, sexos, estadíos juveniles y naupliares de copépodos cyclopoides. Esta información puede ser usada para establecer correlaciones con factores externos (Antezana *et al.*, s.f, Begon *et al.*, 2006) y determinar especies que puedan ser utilizadas como bioindicadores.

El presente trabajo tiene como objetivo generar el conocimiento en cuanto al comportamiento de características ecológicas de las poblaciones como la abundancia, sexos, estadíos, riqueza de especies de copépodos cyclopoides que se encuentran en cuerpos de agua contaminados y no contaminados, contemplando la estacionalidad climática en sistemas acuáticos del Municipio de Matehuala en San Luis Potosí, México.

ANTECEDENTES

La contaminación del agua por metales y metaloides ha sido tema de interés a nivel mundial; por ejemplo, Gunduz *et al.*, (2010) realizaron un estudio en Turquía enfocado en la contaminación de aguas subterráneas por arsénico. El estudio constó de una campaña de muestreo en la cual se muestrearon 27 pozos encontrando concentraciones de arsénico entre 0.09 y 0.56 mg/l. Así mismo, identificaron que el origen de la contaminación se debió a la composición mineral de la roca, derivado de una minería en operación anteriormente.

Por otra parte, Patel *et al.*, (2005) determinaron concentraciones de arsénico en agua y granos de arroz en la India. Los resultados mostraron para el agua valores de entre 0.1 y 0.82 mg/l, mientras que para los granos de arroz los valores se encontraron entre 0.0018 y 0.446 mg kg.

En la región Sudamericana, Bundschuh *et al.*, (2008) mencionan que al menos cuatro millones de personas en países de América del Sur, entre ellos Argentina, Chile y Perú utilizan agua contaminada con arsénico (>0.05 mg/l), destacando el estudio realizado al norte de la provincia de la Pampa, en el cual, en un estudio de monitoreo de calidad del agua en los servicios de distribución se analizó la concentración de As en diez zonas provinciales que abarcaron un total de 79 localidades; la concentración de As en las muestras analizadas estuvo entre 0.03 y 0.35 mg/l, hecho que demuestra la magnitud del problema en esa provincia, agravándose por el hecho de que este elemento se presenta en forma cuantitativamente heterogénea, y su presencia y distribución no tienen relación con la hidrogeología regional sino más bien parece estar relacionada con características de tipo local.

En México, los primeros casos de la contaminación con arsénico datan de 1962. En cuanto a estudios se destacan dos, primeramente el realizado por Rosas *et al.*, (1999) en la Comarca Lagunera, en el cual colectaron muestras de un litro de agua y encontraron valores que oscilan entre los 0.74 y 0.59 mg/l. El 90% del total de arsénico se encontró como As(V).

Por otra parte, Mendoza *et al.*, (2012) realizaron un análisis de calidad del agua en diferentes regiones en el estado de Aguascalientes, México, identificando contaminación por metales pesados, entre ellos el arsénico. Se identificaron 42

comunidades expuestas a altas concentraciones de arsénico en agua para consumo humano, comprendiendo un total de 95 000 habitantes. En esas comunidades se presentaron casos de hiperqueratosis palmoplantar relacionada al hidroarsenicismo.

Para San Luis Potosí, en el distrito minero de Santa Ma. de la Paz se han efectuado diversas investigaciones para evaluar las afectaciones ambientales debido a los residuos mineros depositados por más de dos siglos, encontrándose que en el agua superficial almacenada en tanques presenta cantidades de arsénico de hasta 0.4 mg/l debido a su interacción con los residuos mineros (Armienta *et al.*, 2008).

Las actividades relacionadas con la extracción y el procesamiento de los minerales han contaminado también otros sitios en el mismo Estado; por ejemplo, en el Municipio de Matehuala, Razo *et al.*, (2004) publicaron los resultados de un muestreo realizado en el área de Cerrito Blanco y zonas circunvecinas, en el cual recolectaron muestras de aguas superficiales y subterráneas de dos sistemas hidrológicos constituidos por pozos artesanales y canales construidos por los habitantes del lado Este de la ciudad de Matehuala. Estos dos sistemas de pozos y canales fueron identificados como sistemas de canales Cerrito Blanco y Carbonera. En el caso de Cerrito Blanco, los resultados arrojados de este estudio fueron concentraciones de arsénico mayores a 5.9 mg/l, excediendo con ello cien veces los valores establecidos en la NOM-127-SSA-1994 de 0.05 mg/l. Así mismo, Briones-Gallardo y Razo-Soto (2008) reportaron para la misma área concentraciones de arsénico en el rango de 5.8 a 7.4 mg/l.

Por otra parte, Martínez-Villegas *et al.*, (2013) publicaron los resultados del muestro realizado en el mismo canal de Cerrito Blanco, en el cual obtuvieron una concentración de arsénico promedio de 13 mg/l entre agosto del 2008 y enero del 2009, el cual disminuyó a 6 mg/l entre febrero y mayo del 2009 para volver a incrementar a 16 mg/L entre Junio y Agosto del mismo año, sobrepasando el límite máximo permisible de 0.05 mg/l establecido por la NOM-127-SSA-1994.

En materia de zooplancton utilizados como indicadores de contaminación del agua, *in situ* o en bioensayos, Gagnetén (2008) determinó el grado de contaminación por metales pesados (Cr, Cu, Pb y Cd) en agua de la cuenca del Rio Salado, Argentina. Así mismo, estudió los principales atributos del zooplancton (Copépoda, Cladóceras y Rotíferas) de cursos de agua pertenecientes a la cuenca y los relacionó con las concentraciones de metales pesados en el agua, con base en un análisis de biomasa,

densidad, riqueza de especies (S), equitatividad (E) y diversidad de especies (H). Finalmente, evaluó la capacidad de acumulación de Cr en especies seleccionadas de cladóceros y copépodos de agua dulce. Sus resultados mostraron que la densidad total de organismos fue superior en el sitio de referencia que en los otros sitios más contaminados, siendo los copépodos los dominantes de la comunidad, aunque los copépodos adultos se encontraron pobremente representados tanto cualitativa como cuantitativamente. La dominancia que se observó se debe a la gran proliferación de estadios larvarios y juveniles (larvas nauplio y copepoditos). Por otra parte, se registró una acumulación de Cr en el copépodo *Argyrodiaptomus falcifer* Daday, 1905 en las tres concentraciones de los bioensayos utilizados.

Para el sitio de estudio, Mendoza-Chávez (2016) realizó un trabajo contemplando dos campañas de muestreo (abril del 2015 y mayo del 2016) recolectando muestras de agua y zooplancton de cinco sitios (Club de Tiro, Abrevadero, Laguna, Presa y Canal). Los resultados de la primera campaña arrojaron una abundancia de entre 0.1- 6.04 ind/l para los sitios, con mayor presencia de copépodos y cladóceros. Mientras que en la segunda campaña la abundancia se encontró entre 0.19- 92.82 ind/l con mayor presencia de cladóceros, rotíferos y copépodos. En cuanto a concentraciones de arsénico y con base en la NOM-127-SSA-1994 (con límite máximo permisible de 0.05 mg/l), el sitio Club de Tiro presentó valores más altos de arsénico de 38.98 y 53.23 mg/l en la campaña 1 y 2 respectivamente, sobrepasando el límite máximo permisible. Por otra parte, el sitio denominado canal fue el que presentó menores concentraciones con 0.01 mg/l (campaña 1) y 0.1 mg/l (campaña 2), manteniéndose por debajo de lo establecido por la norma.

JUSTIFICACIÓN

La contaminación por metales pesados de los cuerpos de agua epicontinentales es un problema que ha ido a la alza en los últimos años. Gagneten (2008) menciona un aspecto de esa problemática que no se destaca, y es que la contaminación es esencialmente un fenómeno biológico debido a que sus efectos primarios se ejercen sobre la biota.

Anteriormente, era común estudiar la contaminación de los metales pesados únicamente en términos físico-químicos a través de la medición de esas variables; sin embargo, con el paso del tiempo esto ha cambiado y se ha incluido a la biota como un componente esencial de esa problemática, siendo importante señalar que el zooplancton ocupa un componente clave en los sistemas acuáticos.

Caumette *et al.*, (2011) reportaron la presencia de zooplancton en agua contaminada con arsénico. Lo anterior, conllevó a la realización de estudios en ese ámbito, siendo el de Mendoza-Chávez (2016) el más reciente para la zona de estudio, determinando la riqueza y abundancia de copépodos, rotíferos y cladóceros y su variación en diferentes concentraciones de arsénico en el agua sin tener en cuenta las épocas climáticas.

No obstante, a pesar de ese estudio, quedan varias cuestiones que resolver, especialmente en los copépodos. Aunado a que existen pocos estudios que evalúen la estructura de la comunidad zooplanctónica en agua con arsénico, este estudio radica en analizar atributos ecológicos como la abundancia, tallas, riqueza de especies, estadíos y proporción hembras-macho de copépodos cyclopoides en tres cuerpos de agua con y sin influencia de arsénico en tres épocas climáticas (lluvias, secas y frías), así como el establecimiento del cuadro ambiental con base en las siguientes variables físico-químicas: concentración de oxígeno disuelto (mg/l), temperatura (°C), conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}^3$), pH, salinidad (psu) y arsénico (mg/l).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como resultado de lo anterior, se plantean el siguiente cuestionamiento:

¿Cómo es el comportamiento de la estructura del zooplancton (abundancia, tallas, proporción de machos y hembras, estadíos y riqueza de especies) en tres sistemas acuáticos epicontinentales con y sin influencia de arsénico en tres épocas climáticas reportadas en el norte del país?

OBJETIVO

Evaluar la abundancia, tallas, riqueza de especies, proporción hembras-machos y estadíos de copépodos cyclopoides en tres cuerpos de agua (con y sin influencia de arsénico) de Matehuala, San Luis Potosí, México en tres épocas climáticas del año.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar la abundancia, tallas, riqueza de especies, proporción hembras-machos y estadíos de copépodos cyclopoides presentes en cada sistema estudiado.
- Identificar las especies pertenecientes a la Subclase Copepoda: Orden Cyclopoida presentes en cada sistema estudiado.
- Determinar la variación físico-química (oxígeno disuelto (mg/l), temperatura (°C), conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}^3$), pH y salinidad (psu), (incluyendo las concentraciones de arsénico presentes) en los cuerpos de agua analizados.

ÁREA DE ESTUDIO

Localización

El municipio de Matehuala se encuentra localizado en la parte norte del Estado de San Luis Potosí, en la zona altiplano (Fig. 2). La cabecera municipal tiene las siguientes coordenadas: 100° 39' de longitud oeste y 23° 39' de latitud norte, con una altura de 1,570 metros sobre el nivel del mar. Sus límites son: al Norte Cedral, al Este el Estado de Nuevo León, al Sur Villa de Guadalupe, al Oeste Villa de Guadalupe y Villa de la Paz (H. Ayuntamiento de Matehuala, 2006).

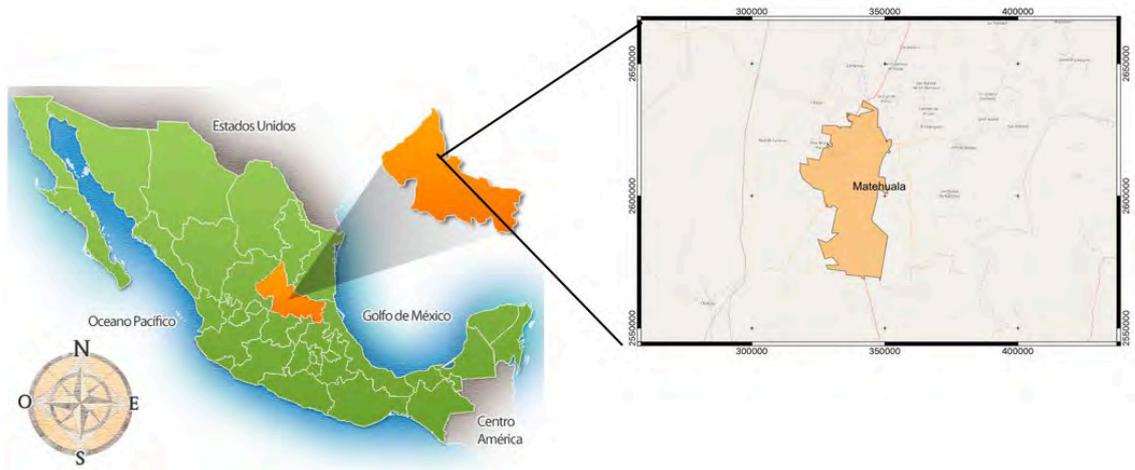


Figura 2. Ubicación del municipio de Matehuala, San Luis Potosí.

Geología y edafología

El relieve está constituido por sierras de rocas sedimentarias marinas del mesozoico y suelo perteneciente al cenozoico, además de conglomerados (caliza-lutitas). La mayor parte del área se encuentra cubierta por suelos aluviales que constituyen la unidad de planicie. Con base a las características geomorfológicas del sitio, este pertenece a la proporción de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, formada por un conjunto montañoso el cual ha sido uno de los más erosionados debido a las condiciones climáticas tales como lluvias y corrientes del aire. Así mismo, se encuentra dentro de la clasificación de las regiones áridas y semiáridas. El tipo de suelo predominante es de cálcico a xerosol gypsicó con un incremento gradual de yeso hacia el centro (H. Ayuntamiento de Matehuala, 2006).

Hidrología

El único recurso es la explotación de mantos acuíferos, que puede ser aprovechado para ampliar parcelas de riego. El agua es altamente salina, con bajo contenido de sodio y se nutre de una precipitación pluvial de 450 mm anuales, con la principal época de lluvias en verano y otra de menor importancia en invierno, que generan corrientes intermitentes en la mayor parte de la entidad y corrientes perennes en la región oriental y suroriental (H. Ayuntamiento de Matehuala, 2006; Lara-Del Río, 2015).

Climatología

Predomina el clima seco semi-cálido; sin embargo, en la parte extrema noroeste tiene una pequeña franja de clima seco templado. La temperatura promedio anual es de 14 °C y la precipitación promedio es de 470 mm; así mismo, se presentan heladas entre cinco y diez días al año. (CEFIM, s.f; Razo et al., 2004; INEGI, 2007).

Por otra parte, Espinosa-Muñoz (2011) menciona que para el Estado de San Luis Potosí se distinguen cuatro épocas climáticas: semiseca fría, seca cálida, semiseca templada y seca templada (Tabla 1).

Tabla 1. Clima estacional de la ciudad de S.L.P. Tomado de Espinosa-Muñoz (2011)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
SEMISECA FRÍA	X	X										X
SECA CÁLIDA			X	X								
SEMISECA TEMPLADA					X	X	X	X	X			
SECA TEMPLADA										X	X	

Vegetación

La vegetación predominante es el matorral xerófilo, el cual abarca comunidades de fisonomías muy diversas, características de las zonas áridas y semiáridas. Incluye comunidades en las que predominan arbustos altos o árboles bajos de 3 a 5 m de altura, caducifolios (generalmente por un periodo breve durante la época de secas), con hojas o folíolos de tamaño pequeño. Predomina una baja densidad debido a que las condiciones de aridez limitan la producción de biomasa. Se pueden agrupar en tres variantes, de acuerdo con la forma de vida de los componentes vegetales dominantes: leñosos, suculentos y herbáceos (Soberón y Challenger, 2008).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los sitios de muestreo se encuentran localizados en el Municipio de Matehuala, San Luis Potosí. Comprende un total de tres puntos, denominados: Club de tiro (1), Laguna (2) y Presita (3) (Fig. 3), pertenecientes al complejo hidráulico Matehuala-Cerrito Blanco (Martínez-Villegas *et. al.* 2013). Los sitios son representativos de sistemas acuáticos con alta, media y nula contaminación con arsénico, tal y como lo determinó Mendoza-Chávez en el año 2016 (Tabla 2).

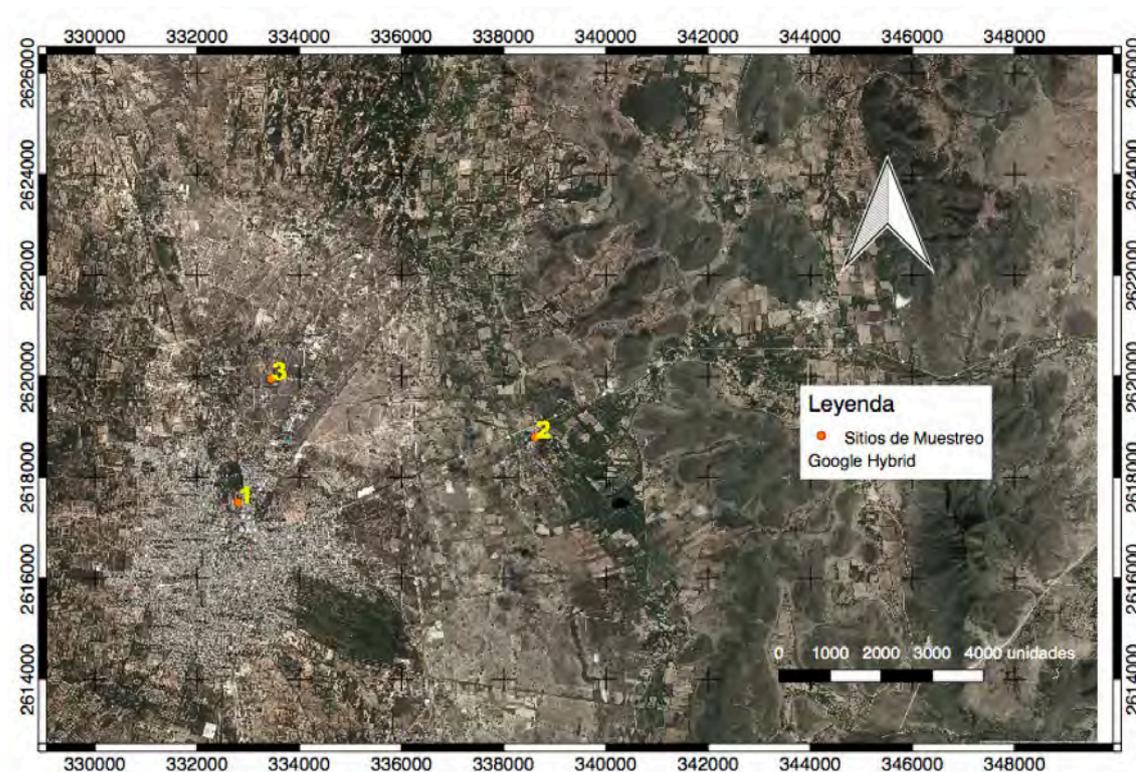


Figura 3. Localización de los sitios de muestreo en Matehuala, San Luis Potosí.

Tabla 2. Concentraciones promedio de arsénico en los sitios de muestreo. Modificada de Mendoza-Chávez, 2016

Sitio	Lugar	Concentración promedio de arsénico (mg/l)
1	Club de tiro	46.5
2	Laguna	3.6
3	Presita	0.1

Campaña de muestreo

La primera etapa de este trabajo comprendió la realización de una revisión de datos históricos de temperatura (Anexo 1) y precipitación (Anexo 2) en Matehuala, San Luis Potosí de los últimos 32 años consecutivos a fin de seleccionar días clave y representativos de la época de seca, lluvia y fría. Los datos fueron obtenidos en los registros de la Estación Climatológica Zaragoza del Municipio de Matehuala.

Con base en lo anterior, se establecieron tres campañas de muestreo: Julio del 2017, Diciembre del 2017 y Mayo del 2018 en las cuales se recolectaron muestra de agua y material biológico de los sitios Club de Tiro, Laguna y Presita.

Abundancia

Para la determinación de la abundancia, los organismos se colectaron con una red de zooplancton con apertura de malla de 45 micrómetros, adaptada a un recipiente colector. Posterior a la colecta, se realizó un análisis cuantitativo del total de individuos de la Subclase copepoda, Orden Cyclopoida con ayuda de un microscopio óptico Olympus modelo CX21. La abundancia se expresó en individuos por litro (ind/l).

Riqueza

Se basa en conocer el número de especies que se encuentran en un determinado ambiente. Para su determinación se utilizaron claves específicas y literatura especializada como la de Elías-Gutiérrez *et al.*, (2008) a fin de determinar la identidad de cada individuo hasta su mínimo taxón posible.

Tallas

Se realizó la medición de la longitud total de cada organismo con el fin de obtener la estructura de tallas a nivel espacial y temporal a través del empleo de tablas de datos de frecuencias agrupadas (Daniel, 1990).

Así mismo, por medio de la regla de Sturges se calculó el número de clases necesarias ($C= 3.3 \cdot \log n+1$), la amplitud de cada clase se determinó por medio de la siguiente fórmula:

$W = R / C$

Donde ($R = V - L$)

C= clase

V= medida mayor

W= amplitud de la clase

L= medida menor

n= número de medidas

R= rango

Posteriormente se construyeron polígonos de frecuencia de las tallas de los organismos y se agruparon por punto de colecta y estacionalidad climática. Con base en la distribución de frecuencia de los organismos, se determinó la estructura de tallas de los copépodos cyclopoides.

Proporción hembras-machos

En lo que respecta a la proporción por sexos, se determinó el sexo de cada individuo adulto tomando en cuenta sus características morfológicas diferenciales; por ejemplo, forma de las anténulas, presencia de espermátóforos, número y cantidad de huevecillos, etc.

Parámetros físicos-químicos

Se realizó *in situ* la medición de los parámetros físico-químicos como concentración de oxígeno disuelto (mg/l), temperatura (°C), conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}^3$), pH y salinidad (psu) con ayuda de una sonda multiparamétrica Marca Hanna Instruments Modelo HI9829.

Determinación de arsénico en muestras de agua

Para la determinación de arsénico en muestras de agua se siguió el método 207 Rev. 4.4 Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry, el cual, con base en la descripción realizada Mendoza-Chávez (2016) consiste en un plasma de acoplamiento inductivo (ICP) como fuente de ionización que junto a un espectrofotómetro de emisión óptico (OES) constituye el equipo de ICP-OES, marca Varian modelo 730 ES, en el

Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental, del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C.

Custodia de las muestras

Se llevó acabo a través de la Cadena de Custodia (Anexo 3), en la cual se registraron la obtención, transporte y entrega de las muestras a un laboratorio. El registro se realizó *in situ*. La Cadena de Custodia debe tener por lo menos estos elementos básicos:

1. Nombre de las agencias
2. Programa del muestreo
3. Nombre del responsable del muestreo
4. Nombre de los muestreadores participantes (funciones)
5. Nombre del laboratorio que recibe las muestras
6. Nombre y firma de las personas que entregan y reciben las muestras
7. Clave de la muestra
8. Fecha y hora
9. Nombre del sitio
10. Número de contenedores
11. Método de colecta
12. Análisis requeridos
13. Observaciones

RESULTADOS

Riqueza específica (S) y respectiva abundancia por sitios

El análisis taxonómico del grupo Copepoda realizado en cada sitio durante las tres épocas climáticas muestra la presencia de tres especies, comprendidas en tres géneros; así mismo, se determinaron sus respectivas abundancias (Tabla 3). Se puede observar que el sitio Laguna fue el que más riqueza presentó al encontrarse dos especies, la primera, *Acanthocyclops americanus* Marsh, 1893 que se encontró durante la temporada de frías y secas con abundancias de 0.79 y 1.73 ind/l respectivamente; la segunda especie, fue *Eucyclops chihuahuensis* Suárez-Morales & Walsh, 2009, que se encontró en la época de secas con una abundancia de 0.35 ind/l.

Por otra parte, para el sitio Club de Tiro, únicamente se registró la especie *Paracyclops chiltoni* Thomson G.M., 1883, la cual fue encontrada en todas las épocas climáticas, presentando abundancias de 1.1 ind/l en lluvias, 4.67 ind/l en frías y 25.17 ind/l en secas. Finalmente, para el sitio Presita no se registraron especies durante las épocas estudiadas, pero si abundancias (juveniles y nauplios) extremadamente bajas.

Tabla 3. Especies de copépodos registradas y abundancias en los sitios Presita (1), Laguna (2) y Club de Tiro (3). Ep=Época climática; Ll= Lluvia; F= Fría; S= Seca. *Las abundancias están expresadas en individuos por litro (ind/l)

ARHTROPODA	Ep	1	2	3
Subphyllum: Crustacea				
Clase: Maxilopoda				
Subclase: Copepoda				
Orden: Cyclopoida				
Familia: Cyclopidae				
<i>Paracyclops chiltoni</i> Thomson G.M., 1883	Ll			1.1
	F			4.67
	S			25.17
<i>Acanthocyclops americanus</i> Marsh, 1893	Ll			
	F		0.79	
	S		1.73	
<i>Eucyclops chihuahuensis</i> Suárez-Morales & Walsh, 2009	Ll			
	F			
	S		0.35	

Abundancia total de copéodos cyclopoides

La abundancia total (adultos, juveniles y nauplios) expresada en individuos por litro (ind/l) mostró un comportamiento distinto por temporada estudiada y por sitio. En la época de lluvia la mayor abundancia se presentó en el sitio Club de Tiro con 2.42 ind/l mientras que en los sitios Laguna y Presita la abundancia fue de 0.24 y 0.05 ind/l respectivamente. Para la época denominada como fría la mayor abundancia se presentó en Laguna con 29.48 ind/l seguido del Club de Tiro con 7.64 ind/l, mientras que en Presita no se encontraron organismos. Finalmente, para la época de seca, Club de Tiro registró una abundancia total de 41.58 ind/l (siendo esta la mayor abundancia total registrada en las tres épocas climáticas), seguido de Laguna con 8.59 ind/l y Presita con 1.4 ind/l. Cabe resaltar que la abundancia total decrementa desde el sitio más contaminado (Club de Tiro) hacia el sitio menos contaminado (Presita) (Figura 4).

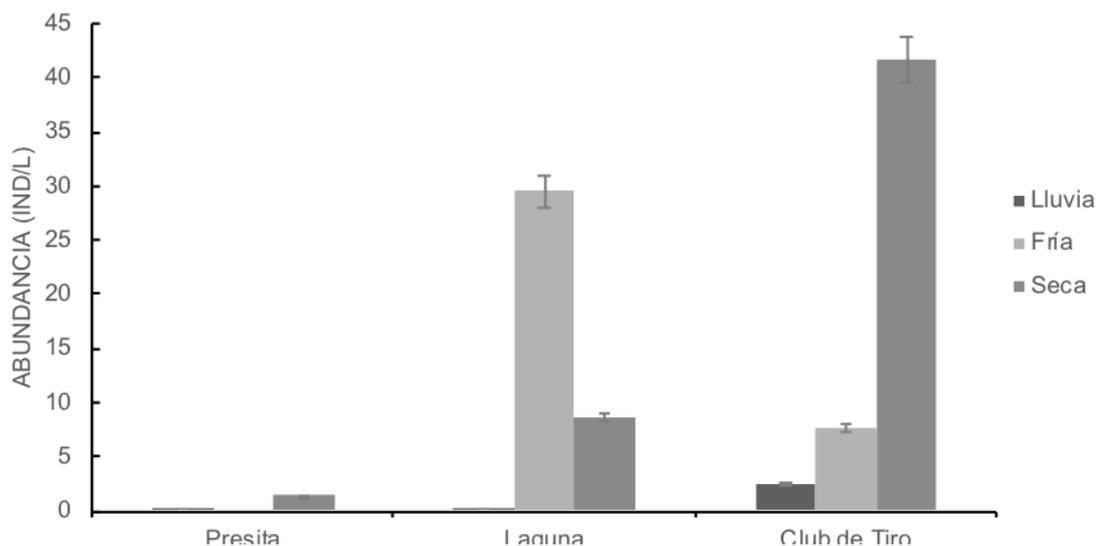


Figura 4. Abundancia total de individuos pertenecientes a la Subclase Copepoda: Orden Cyclopoida durante el estudio. Nota: las abundancias en Laguna y en Presita para época de lluvia no se observan debido a que son muy bajas.

Abundancia por estadios (machos, hembras, copepoditos y nauplios)

En el sitio Presita se observa que para temporada de lluvia las abundancias de copepoditos y nauplios fueron de 0.01 y 0.04 ind/l respectivamente, mientras que para machos y hembras no se encontraron organismos. Por otra parte, en seca los valores de abundancia fueron iguales en nauplios y copepoditos (0.6 ind/l) seguido de hembras con 0.2 ind/l, en cuanto a machos no se encontraron individuos. Con respecto a la temporada de fría, no se encontraron organismos (Fig. 5A).

Para Laguna, durante temporada de lluvias los nauplios presentaron una abundancia de 0.24 ind/l mientras que el resto de los grupos (macho, hembra, copepoditos) no presentaron individuos. Dichas abundancias aumentaron en época de fría, siendo los nauplios el grupo más dominante con 23.5 ind/l seguido de los copepoditos con 5.23 ind/l, mientras que los machos y hembras mostraron valores de 0.31 y 0.48 ind/l respectivamente. En la temporada de secas los nauplios volvieron a ser el grupo con mejor presencia con 6.6 ind/l, seguido de los copépodos hembra con 1.53 ind/l. Los machos y copepoditos registraron valores de 0.27 y 0.16 ind/l respectivamente. En este sitio se observó una dominancia de nauplios por encima de los copépodos adultos a lo largo del estudio (Fig. 5B).

Con respecto al sitio Club de Tiro (Fig. 5C), durante la época de lluvias las hembras presentaron abundancias de 1.03 ind/l a comparación de los machos con una baja abundancia de 0.07 ind/l. Los copepoditos tuvieron abundancias de 1.02 ind/l mientras los nauplios 0.30 ind/l. En la temporada fría, las hembras fueron más dominantes con 4.5 ind/l a diferencia de los machos (0.2 ind/l). Los nauplios tuvieron valores de 1.5 ind/l seguido de copepoditos con 1.4 ind/l. En cuanto a la temporada de seca, las abundancias aumentaron, dominando las hembras con 24 ind/l sobre los machos con 1.2 ind/l. Los copepoditos y nauplios presentaron abundancias de 9.3 ind/l y 7.2 ind/l respectivamente.

Finalmente, cabe destacar la presencia de los estadios nauplio en todos los sitios durante las tres épocas climáticas estudiadas.

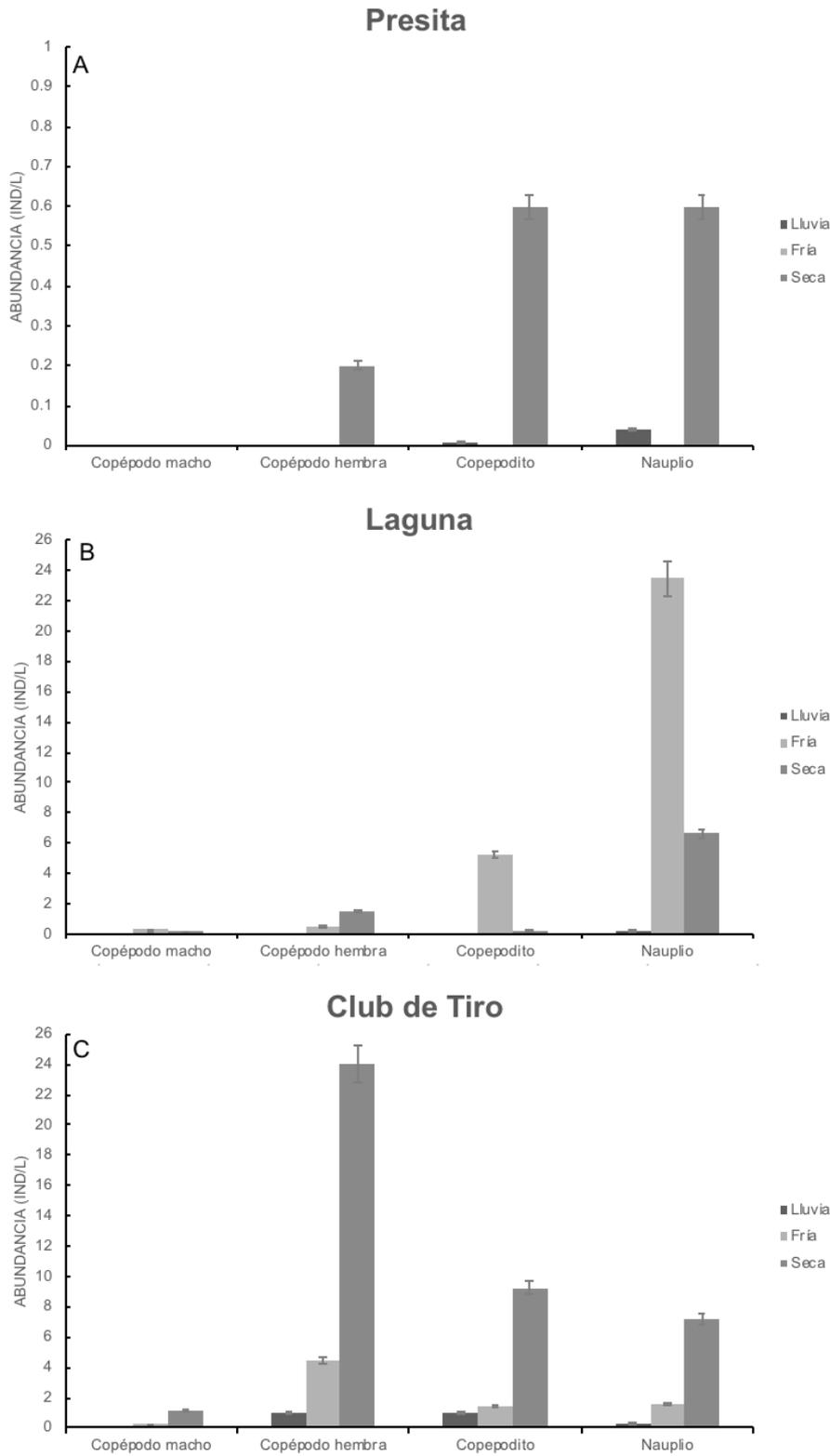


Figura 5. Abundancias de copépodos por grupo en época de lluvia, fría y seca. A) Abundancia de copépodos por grupo en el sitio Presita. B) Abundancia de copépodos por grupo en el sitio Laguna. C) Abundancia de copépodos por grupo en el sitio Club de Tiro. *Note que para la figura 6A la escala es diferente.

Tallas

Estructura de tallas en época de lluvia

De manera general, en Club de Tiro se observó que el rango de tallas de hembras de la especie *P. chiltoni* osciló entre 570 y 754 μm . Se muestra que la mayor frecuencia de tallas se encuentra entre 570-606 y 607-643 μm con un 30%, seguido de la clase 644-680 con un 27%, mientras que las frecuencias menores se encontraron en los rangos de 681-717 y 718-754 μm con un 7%. Se observa una tendencia de decremento conforme las tallas van aumentando (Figura 6).

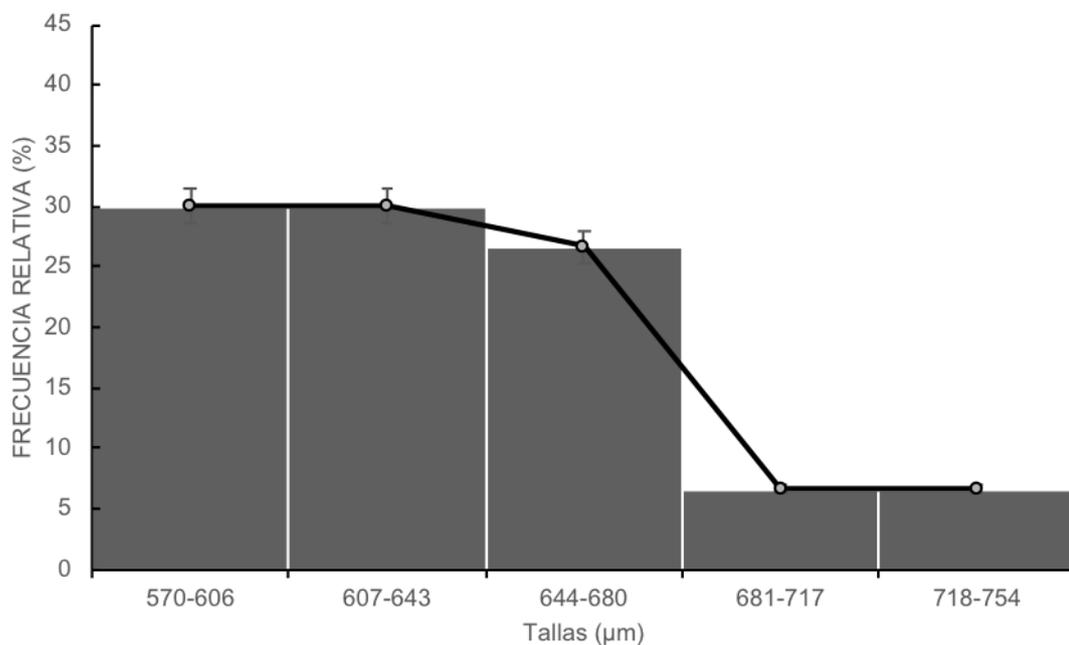


Figura 6. Frecuencia relativa de tallas de copépodos hembra de la especie *Paracyclops chiltoni* en el sitio Club de Tiro

Por otra parte, en cuanto a los machos de la especie *P. chiltoni*, las tallas oscilaron entre los 590 y 690 μm . La frecuencia más alta se encontró en la talla de 600 μm con un 40%, seguido de las tallas 590, 650 y 690 con 20% cada una (Figura 7).

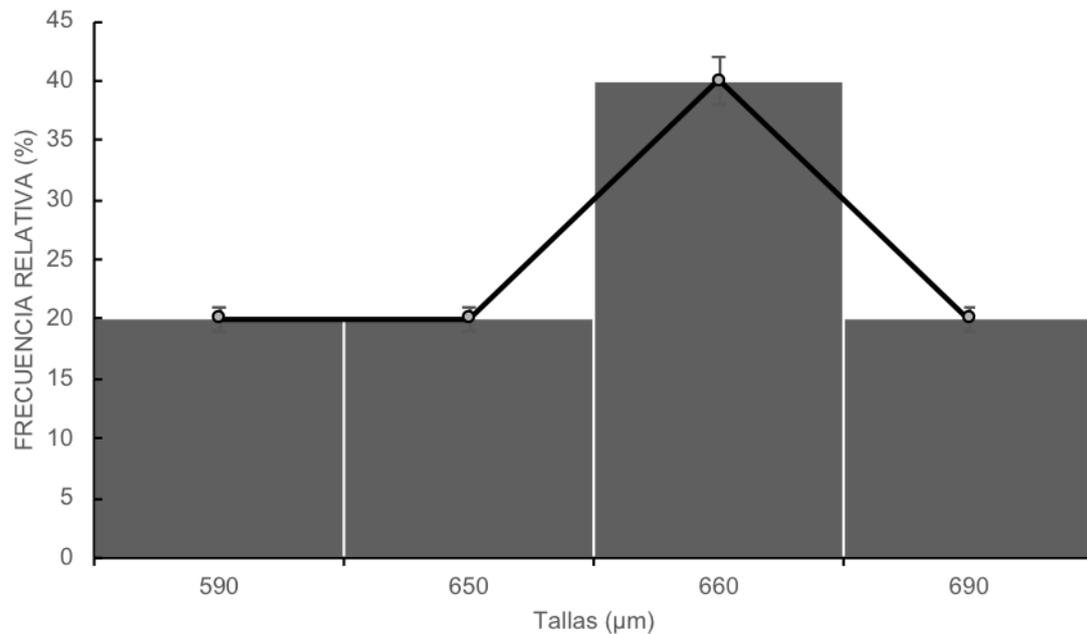


Figura 7. Frecuencia relativa de tallas de copépodos macho de la especie *Paracyclops Chiltoni* en el sitio Club de Tiro

Estructura de tallas en época de fría

En la figura 8 se puede observar que las tallas de hembras de la especie *P. chiltoni* en Club de Tiro se encontraron entre 540 y 668 μm , siendo la clase 583-603 μm la más alta con un 33% de frecuencia, seguido del rango 604-625 μm con 27% y 626-646 μm con 16.7%. El valor más bajo se ubicó en la clase 561-582 μm con 3%.

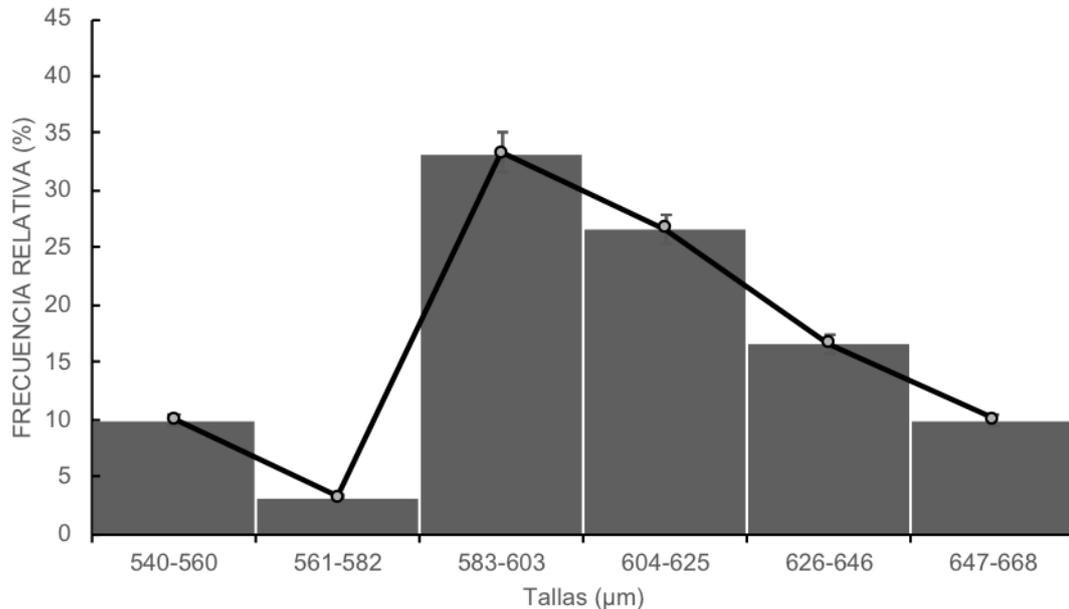


Figura 8. Frecuencia relativa de tallas de copépodos hembra de la especie *Paracyclops chiltoni* en el sitio Club de Tiro

Por otra parte, para los machos en Club de Tiro el rango de tallas más alto se encontró en las clases 579-608 y 609-637 μm con una frecuencia del 35%, seguido de las clases 550-578 y 697-725 μm con un 10%, finalmente las frecuencias más bajas se encontraron en los rangos 638-666 y 667-696 μm con un 5% (Figura 9).

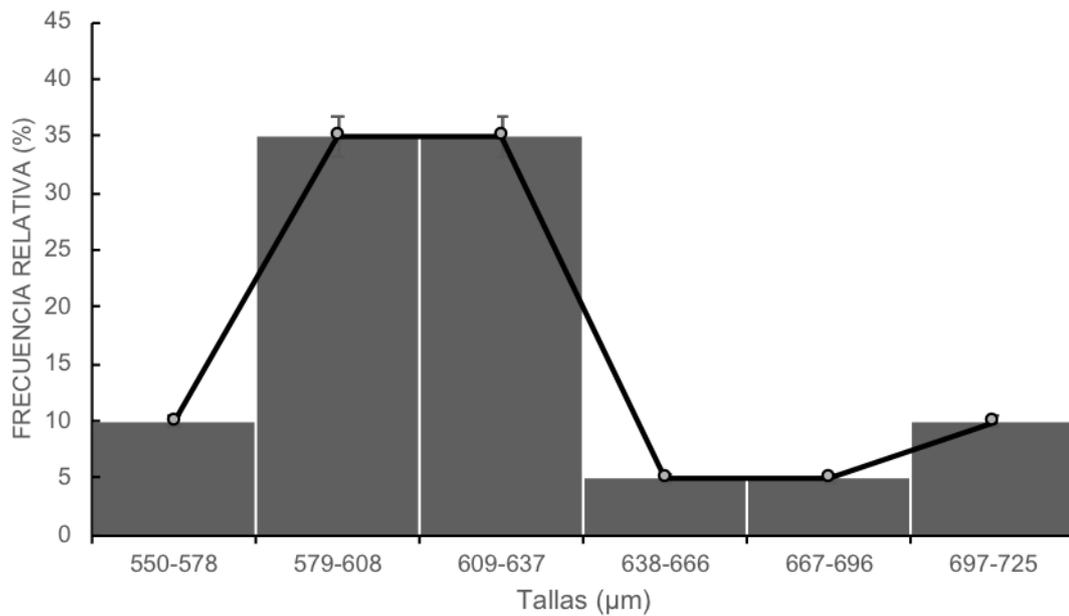


Figura 9. Frecuencia relativa de tallas de copépodos macho de la especie *Paracyclops chiltoni* en el sitio Club de Tiro

En cuanto al sitio Laguna, para las hembras de la especie *A. americanus*, el rango de tallas más alto se ubicó en la clase 870-904 µm con un 43% de frecuencia, seguido de las clases 800-834 y 905-939 µm con 16%. La frecuencia más baja se encontró en el rango 975-1009 con un 3%; sin embargo, en este rango se ubicó el individuo más grande reportado en este estudio con una talla de 1000 µm (Figura 10).

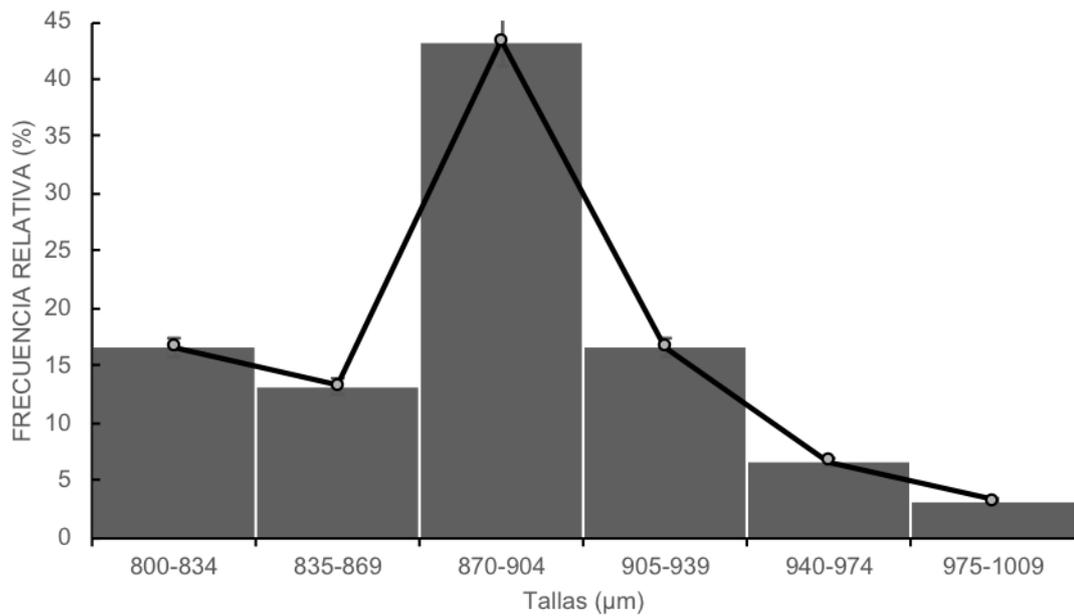


Figura 10. Frecuencia relativa de tallas de copéodos hembra de la especie *Acanthocyclops americanus* en el sitio Laguna

Para el caso de los machos, la frecuencia más alta se registró en la clase 879-914 µm con 35%, seguido de la clase 770-805 µm con 19%. Se mantuvieron tallas constantes en los rangos 806-842 y 843-878 µm con frecuencias del 15%, mientras que la frecuencia más baja se presentó en dos clases, 915-950 µm y 951-987 µm con 8% (Figura 11).

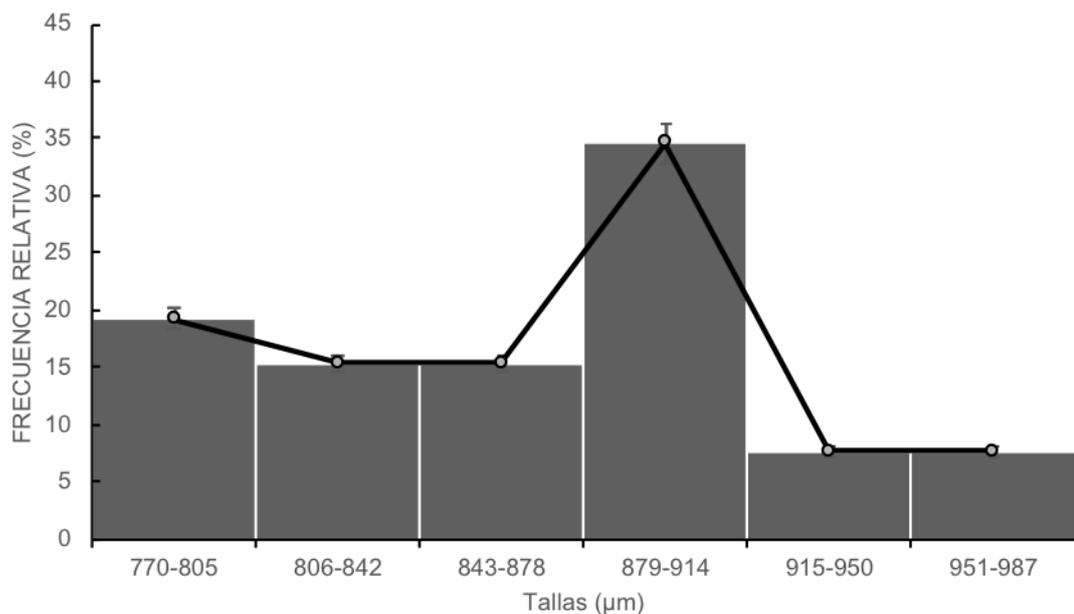


Figura 11. Frecuencia relativa de tallas de copéodos macho de la especie *Acanthocyclops americanus* en el sitio Laguna

Estructura de tallas en época de seca

Con respecto al sitio Laguna, para las hembras de la especie *E. chihuahuensis*, las tallas oscilaron entre los 630 y 830 μm . La frecuencia más alta se encontró en la talla de 760 μm con un 40%, seguido de las tallas 630, 700 y 830 con 20% cada una (Figura 12).

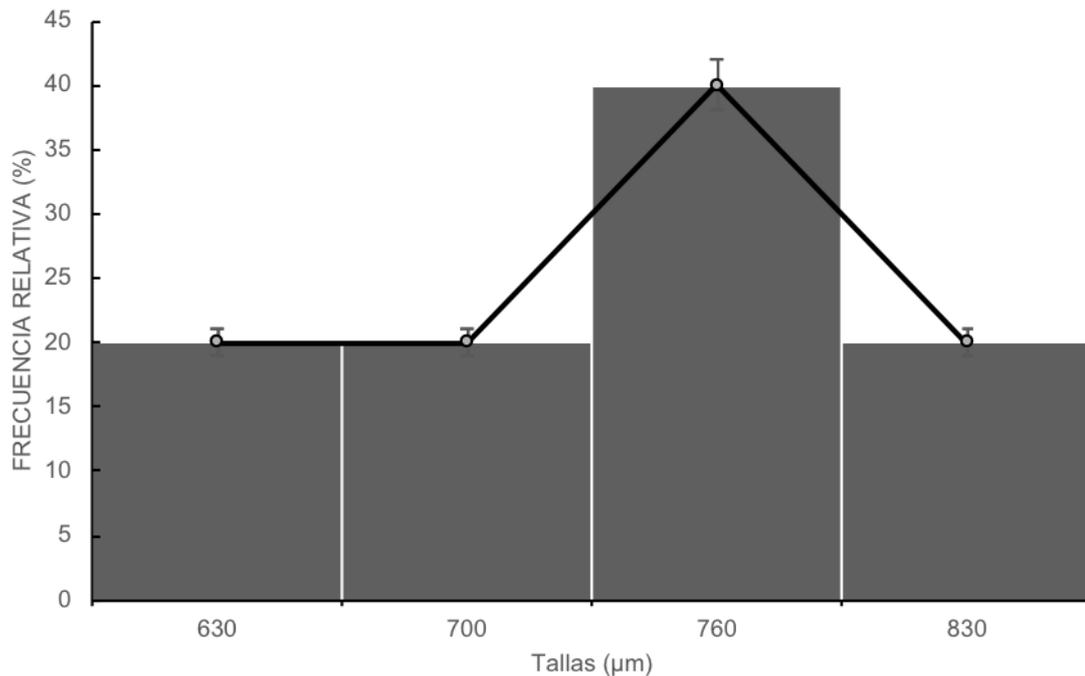


Figura 12. Frecuencia relativa de tallas de copépodos hembra de la especie *Eucyclops chihuahuensis* en el sitio Laguna

La estructura de tallas de *P. chiltoni* en Club de Tiro y de *A. americanus* en Laguna para la temporada de seca no se pudieron determinar debido a técnicos en cuanto a la fijación de los organismos.

Proporción hembras-machos

Proporción hembras-machos en época de lluvia

En lo que respecta a la proporción por sexos, de los 110 individuos sexados de la especie *P. chiltoni* en Club de Tiro, el 93.6% (n=103) fueron hembras mientras que el 6.4% (n=7) fueron machos. Se encontró una relación hembra-macho igual a 15:1 (Figura 13).

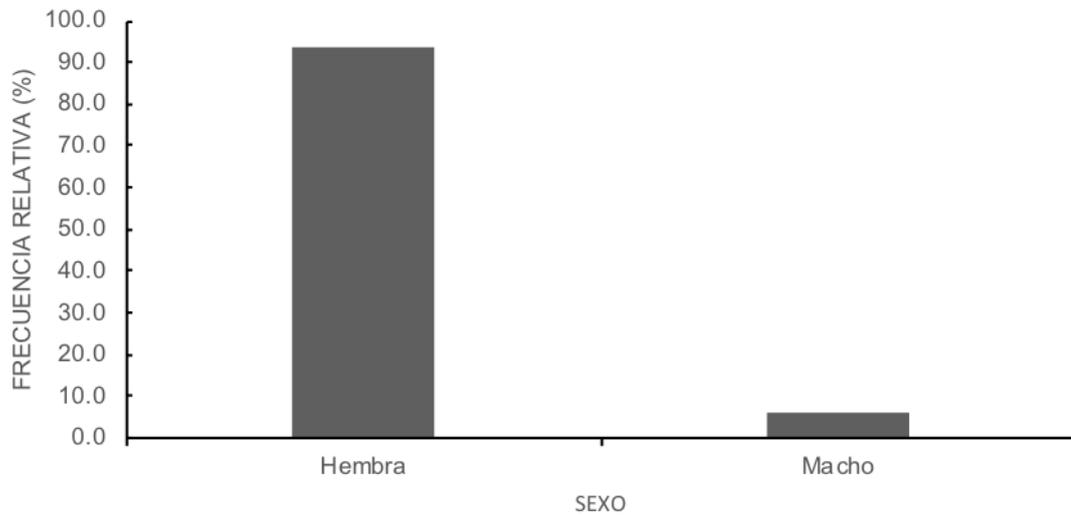


Figura 13. Proporción hembras-machos de la especie *Paracyclops chiltoni* en el sitio Club de Tiro en época de lluvia

Proporción hembras-machos en época de fría

De los 467 individuos sexados de la especie *P. chiltoni*, se encontró que el 95.5% (n=446) fueron hembras, mientras que el 4.5% (n=21) fueron machos. La relación encontrada fue de 21:1 (Figura 14).

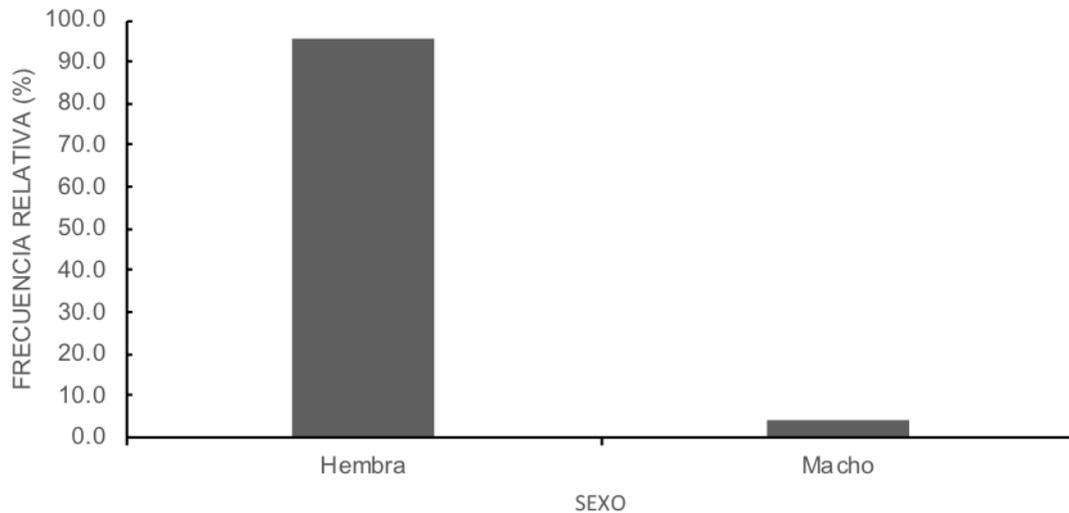


Figura 14. Proporción hembras-machos de la especie *Paracyclops chiltoni* en el sitio Club de Tiro en época de fría

Para el caso de Laguna, se sexaron un total de 38 individuos de la especie *A. americanus*, de los cuales el 60.5% (n=23) fueron hembras; por otra parte, el 39.5% (n=15) fueron machos. La relación encontrada fue de 1.5:1 (Figura 15).

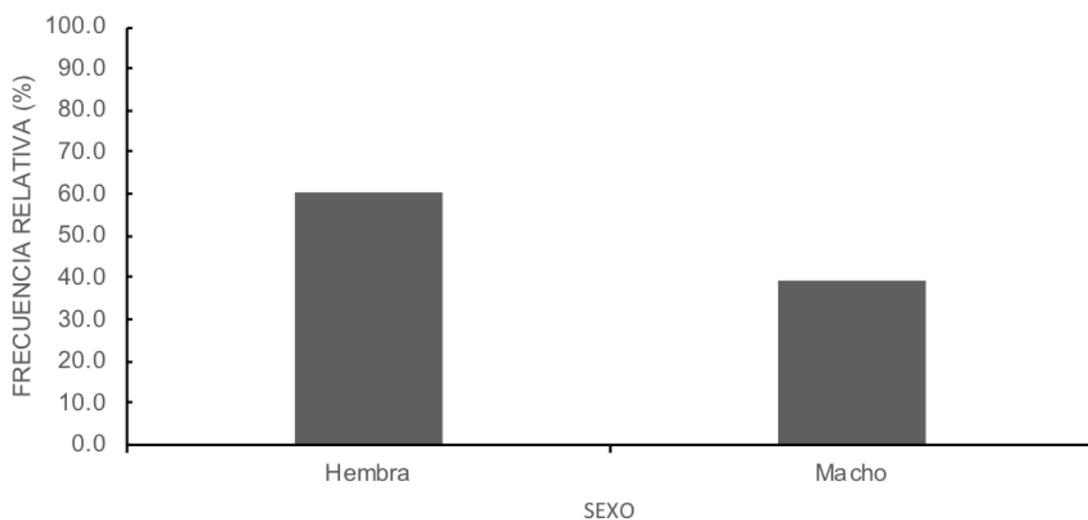


Figura 15. Proporción hembras-machos de la especie *Acanthocyclops americanus* en el sitio Laguna en época de fría

Proporción hembras-machos en época de Seca

En Club de Tiro, de los 302 organismos sexados de la especie *P. chiltoni*, el 95.4% (n=288) fueron hembras mientras que el 4.6% (n=14) fueron machos. Se encontró una relación de 21:1 (Figura 16).

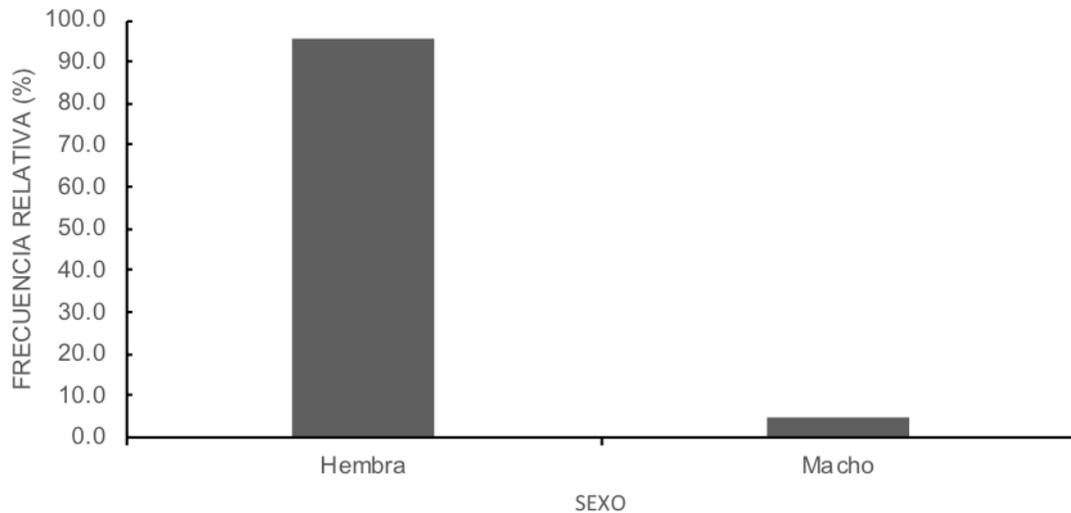


Figura 16. Proporción hembras-machos de la especie *Paracyclops chiltoni* en el sitio Club de Tiro en época de seca

Para el sitio Laguna, se sexaron un total de 86 individuos, el 90.7% (n=78) fueron hembras y el 9.3% (n=8) fueron machos. La relación encontrada fue de 10:1 (Figura 17).

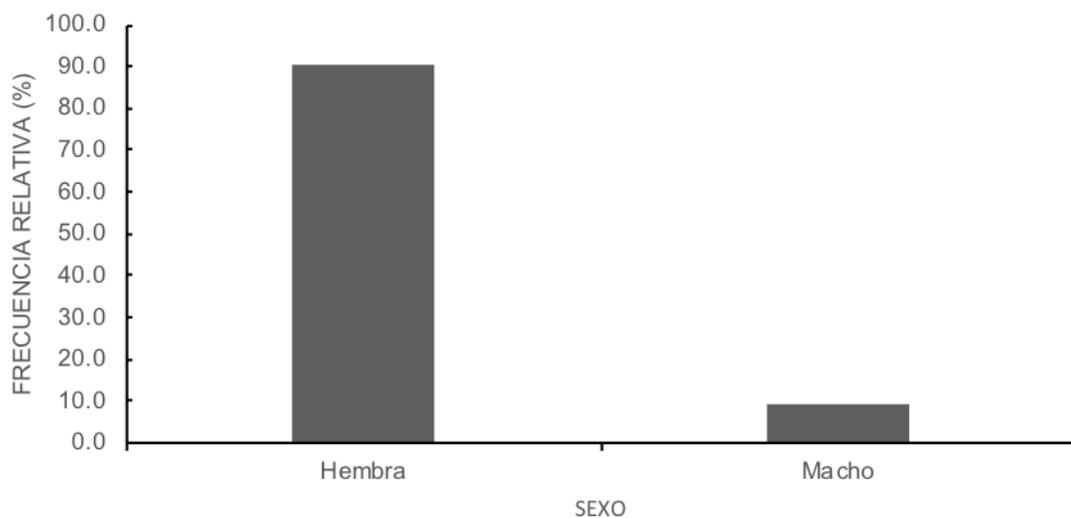


Figura 17. Proporción hembras-machos de copéodos adultos en el sitio Laguna en época de seca

Parámetros físicos y químicos

Temperatura ambiente

De manera general, el promedio más alto de temperatura se presentó en lluvia con 29.5 ± 4.1 °C, siendo Laguna el sitio que mayor temperatura presentó con 33 °C (temperatura ambiente más alta reportada en este estudio) seguido de Club de Tiro (30.62 °C) y Presita (25 °C). Para la temporada de fría la temperatura promedio fue de 19.3 ± 2.9 °C. Para los sitios, los valores disminuyeron considerablemente, reportándose 17.5 °C para Presita (temperatura ambiente más baja reportada en este estudio), 17.7 °C en Laguna y 22.6 °C en Club de Tiro. Para la época de secas se reportaron valores de 31.7 °C en el sitio Presita, seguido de Club de Tiro con 27.6 °C y Laguna con 25.5 °C (Figura 18).

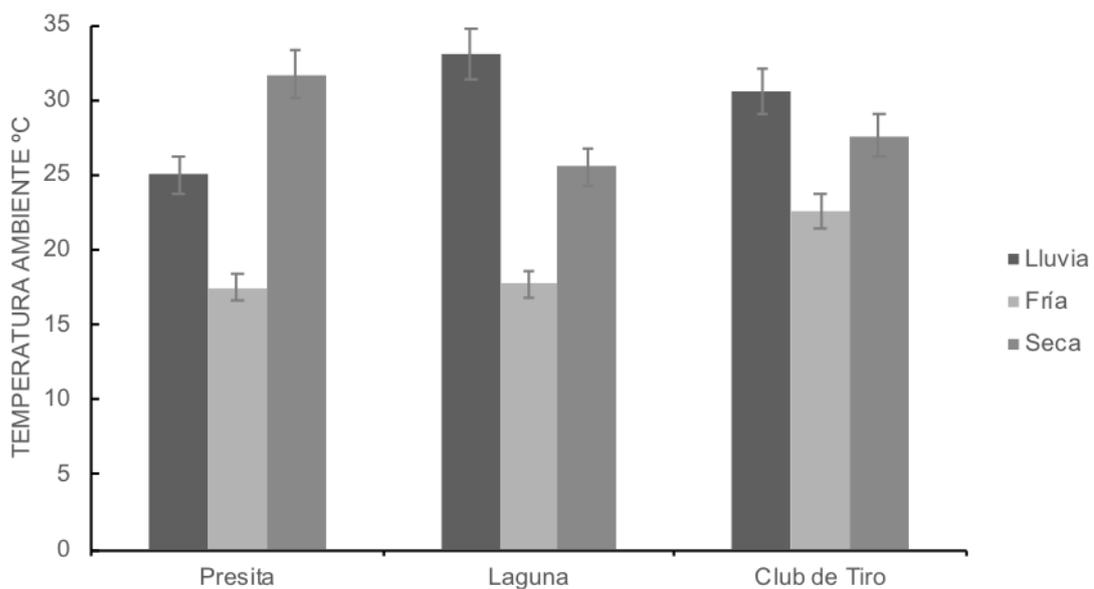


Figura 18. Comportamiento de la temperatura ambiente en cada sitio durante el periodo de estudio

Temperatura del agua

Se puede observar que la época con la temperatura más alta fue lluvia, registrándose un promedio de $25.8 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3.0$. El sitio Laguna presentó un valor de $28.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura del agua más alta en este estudio) seguido de Presita con $25.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y Club de Tiro con $22.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Por otra parte, en época de fría el promedio general fue de $15.8 \pm 2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, la menor temperatura se encontró en Presita ($13.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$), siendo la más baja registrada en este trabajo, posteriormente Laguna ($15.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y Club de Tiro ($18.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Durante seca la temperatura promedio fue de $20.3 \pm 1.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, los valores reportados fueron: $18.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en Presita, $20.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en Laguna y $21.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en Club de Tiro.

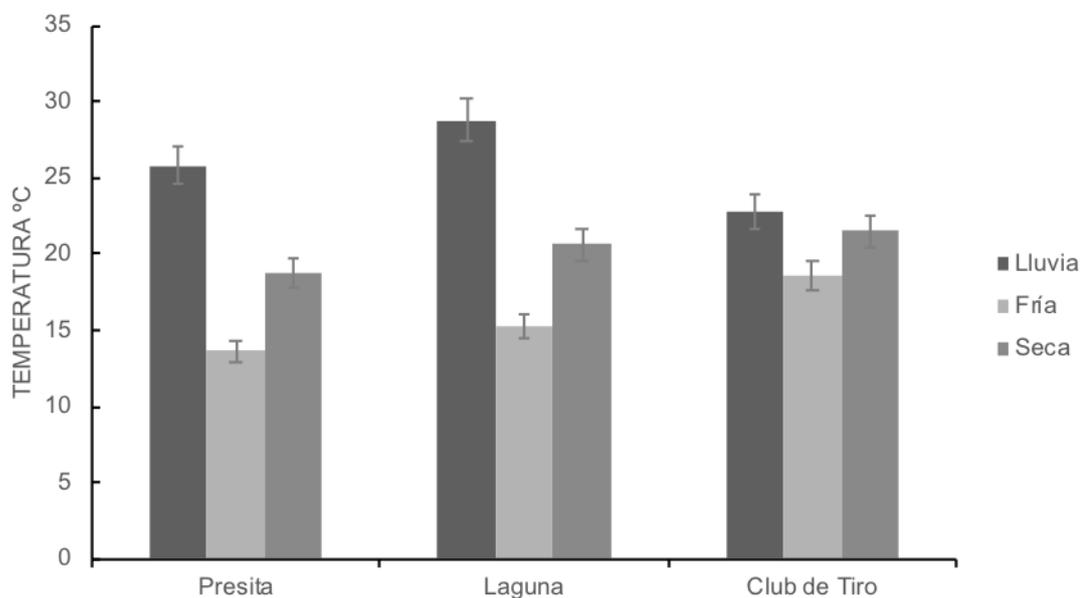


Figura 19. Comportamiento de la temperatura del agua en cada sitio durante el periodo de estudio

Oxígeno disuelto

El valor más alto de esta variable se encontró en la temporada de fría con 15.8 mg/l en Presita, mientras que el valor más bajo se registró en seca con 0.6 mg/l en Club de Tiro. En general, Club de Tiro presentó bajas concentraciones de oxígeno disuelto durante el estudio; se observa que su mayor concentración se encontró en lluvia con 4 mg/l, con un decremento en las siguientes épocas hasta tener su valor mínimo en seca (0.2 mg/l). Así mismo, se observa que en Laguna y Club de Tiro la tendencia de concentración disminuye de lluvia a seca. Por otra parte, seca fue la que presentó las concentraciones mínimas con respecto a las demás épocas climáticas estudiadas, encontrándose valores cercanos a las condiciones de anoxia (Figura 20).

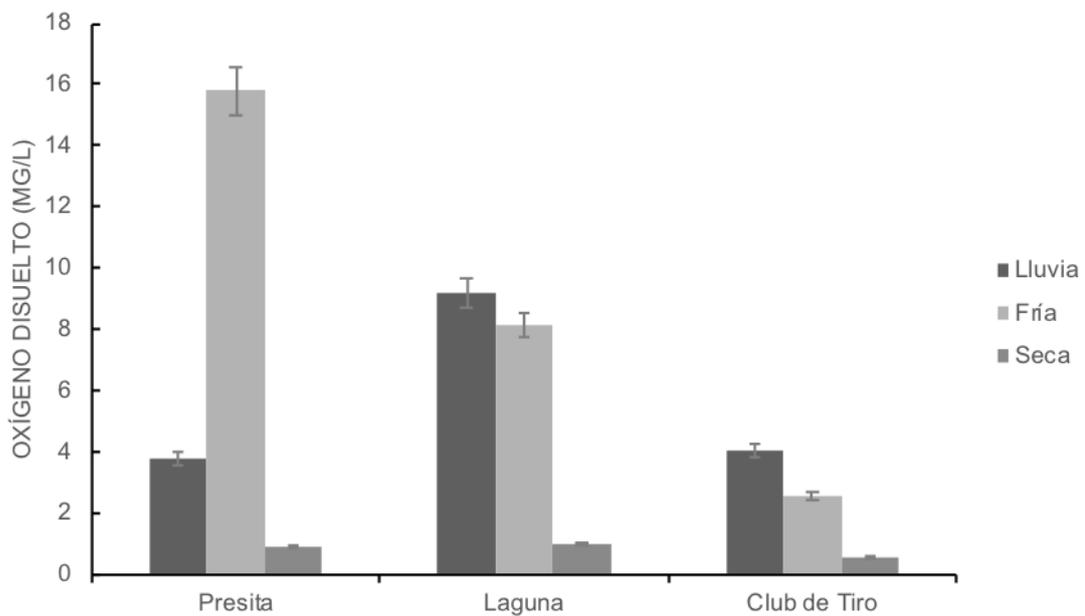


Figura 20. Comportamiento de la concentración de oxígeno disuelto (mg/L) en cada sitio durante el periodo de estudio

Conductividad y salinidad

La conductividad y salinidad son variables que se encuentran relacionadas entre sí; por lo tanto, el comportamiento entre ellas es similar. Para la conductividad, de manera general los valores más altos se presentaron en la época de lluvia con un promedio de $3138 \pm 525 \mu\text{S}/\text{cm}^3$, siendo Presita el sitio con mayor valor con $3475 \mu\text{S}/\text{cm}^3$, seguido de Club de Tiro con $3407 \mu\text{S}/\text{cm}^3$ y Laguna con $2532 \mu\text{S}/\text{cm}^3$. Cabe resaltar que el sitio Laguna fue el que presentó los valores mínimos de conductividad en las tres épocas climáticas estudiadas mientras que los sitios Presita y Club de Tiro presentaron valores similares con una tendencia de disminución de lluvia a seca (Figura 21).

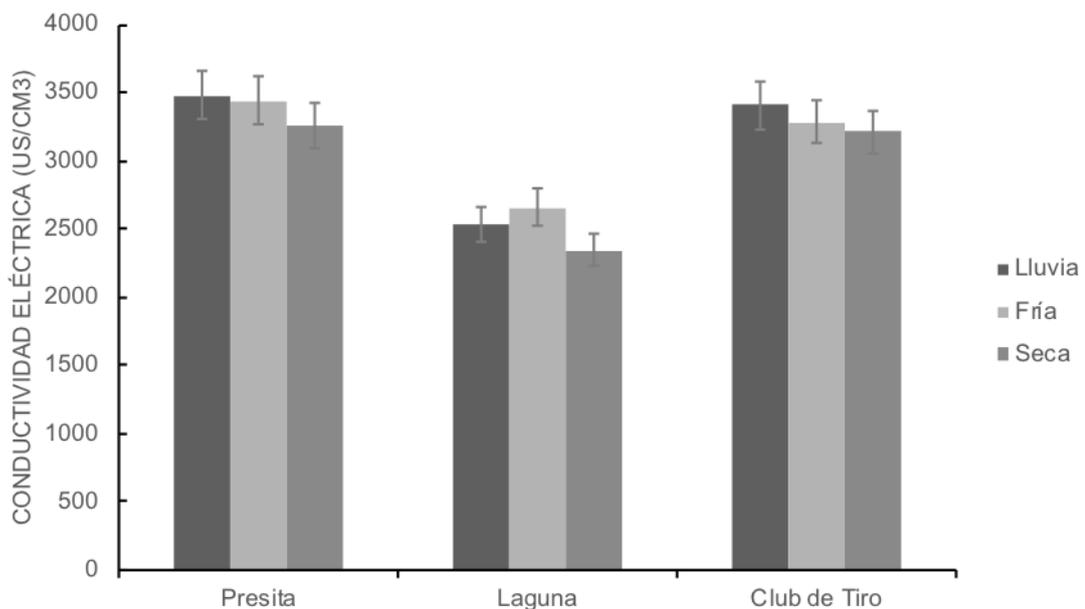


Figura 21. Comportamiento de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}^3$) en cada sitio durante el periodo de estudio

En cuanto a la salinidad, la concentración promedio para cada época climática fue de: 1.6 ± 0.3 p.s.u en lluvia, 1.6 ± 0.2 p.s.u en fría y 1.6 ± 0.2 p.s.u en seca. Lo anterior muestra que, en promedio, la salinidad se mantuvo de manera constante durante el periodo de estudio. Con respecto a los sitios, en Presita y Club de Tiro se observa que los valores son similares en cada temporada, ubicándose entre 1.7 y 1.8 p.s.u. Por otra parte, Laguna presentó un ligero decremento en sus concentraciones, las cuales van desde 1.3 a 1.4 p.s.u, siendo estas las mínimas registradas en el estudio (Figura 22),

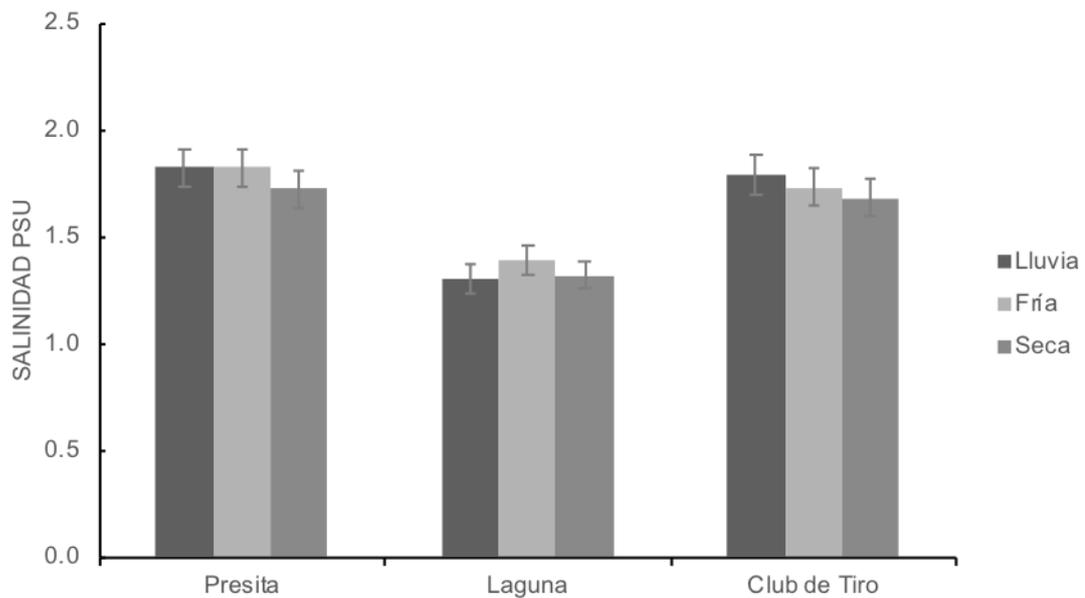


Figura 22. Comportamiento de la salinidad en cada sitio durante el periodo de estudio

pH

El promedio de esta variable por temporada fue de: 7.8 ± 1.1 en lluvia, 7.9 ± 0.7 en fría y 7.6 ± 0.9 en seca. En lo que respecta a los sitios, el valor máximo se encontró en Laguna con 9.1 en lluvias y el valor mínimo en Club de Tiro con 6.8 en secas. Presita presentó un incremento en su pH de lluvias (7.4) con respecto a la época fría (8.4) mientras que en seca se observó ligero un decremento (7.7), siendo este mismo comportamiento registrado en el sitio Club de Tiro. Para el caso de Laguna, se observó un decremento de 9.1 en lluvia a 8.1 en fría y un ligero incremento en seca (8.5). Cabe resaltar que en Club de Tiro se presentaron los valores mínimos en cada época climática (Figura 23).

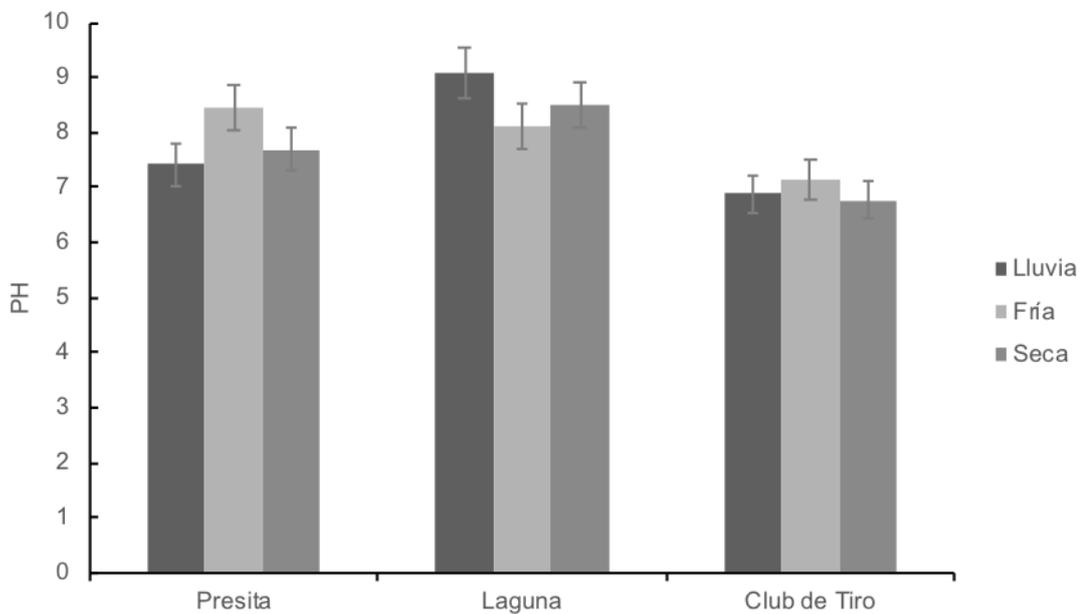


Figura 23. Comportamiento del pH en cada sitio durante el periodo de estudio

Arsénico

En la figura 24 se observan las concentraciones de arsénico en muestras de agua. Club de Tiro fue el sitio que mayores concentraciones presentó, para lluvia se encontró un valor de 54.5 mg/L, incrementándose en fría a 62.6 mg/l (siendo la concentración más alta en el estudio) y disminuyendo en seca a 53.2 mg/l. Para Laguna, se observan valores similares en lluvia y fría con 4.0 y 4.2 mg/l respectivamente, aumentando a 5.3 mg/l en seca. El promedio de arsénico en este sitio fue de 4.5 ± 0.7 mg/l.

Finalmente, en Presita la concentración de arsénico fue de <0.01 mg/l en lluvia, siendo mínima a la del límite de detección y la menor reportada en el estudio; para fría la concentración fue de 0 mg/l y en seca se registró 0.2 mg/l.

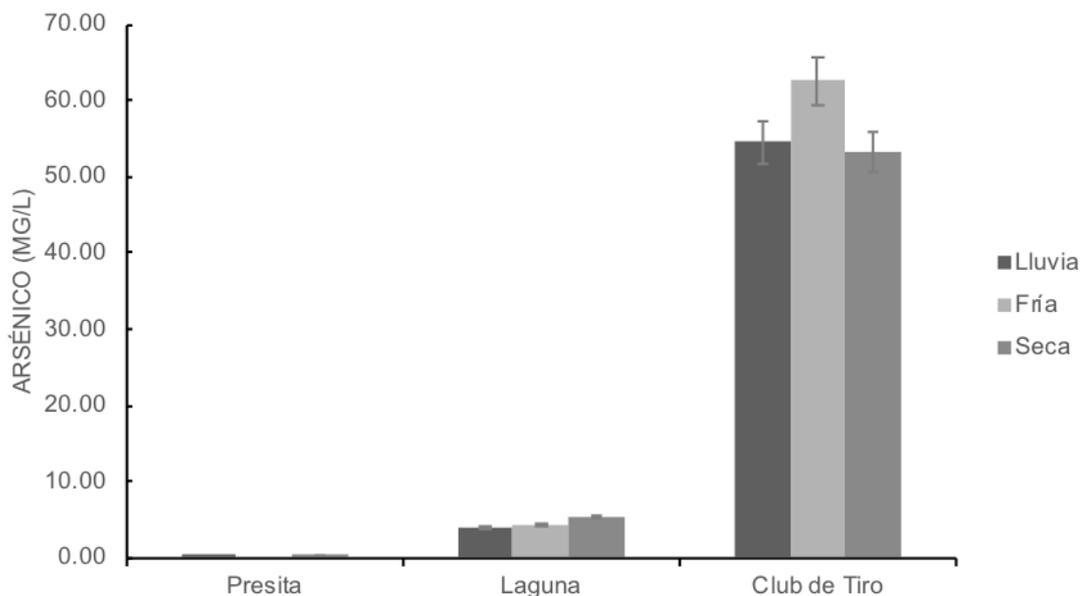


Figura 24. Comportamiento de la concentración de arsénico (mg/L) en cada sitio durante el periodo de estudio

DISCUSIÓN

Riqueza específica

A pesar de la importancia ecológica que representan los copépodos en los sistemas acuáticos, son un grupo que ha sido estudiado de manera fraccionaria y somera en las zonas áridas, principalmente en el Centro-Norte de México (Suárez-Morales & Mercado-Salas, 2011). De las especies registradas en este estudio, *P. chiltoni* y *E. chihuahuensis* han sido reportadas para la zona centro de San Luis Potosí (Mercado-Salas & Suárez-Morales, 2011; Mercado-Salas & Suárez-Morales, 2012). Por otra parte, la especie *A. americanus* es comúnmente encontrada en estanques y lagos pocos profundos de México (García *et al.*, 2011) tal es el caso del sitio Laguna.

Las especies del género *Paracyclops* Claus 1893 han sido registradas en diferentes tipos de hábitats de agua dulce, distribuyéndose en latitudes templadas-frías y en áreas tropicales en las cuales el género tiende a presentar más especies. En México, se encuentran registradas tres (Mercado-Salas & Suárez-Morales, 2009), de las cuales en este estudio se identificó a *P. chiltoni*, siendo una constante a lo largo de las tres épocas climáticas estudiadas, hallándose únicamente en el sitio más contaminado de (Club de Tiro), con concentraciones de arsénico entre 53.2 y 62.6 mg/l. Estudios de laboratorio han demostrado que los metales pesados afectan en menor medida a los copépodos, ya que estos son relativamente más tolerantes a la acción tóxica, lo anterior puede ser explicado debido a su capacidad de acumulación de metales pesados (bioacumulación) (Gagneten, 2008). En cuerpos de agua poco profundos como Club de Tiro, el sedimento se resuspende con relativa facilidad y al estar los metales pesados ligados a la materia orgánica, éstos pueden ser incorporados a la biomasa zooplanctónica por vía trófica. No obstante, son necesarios más estudios para observar y determinar este comportamiento.

Para Laguna, durante lluvia no se encontraron especies de copépodos; sin embargo, cabe resaltar que se encontró una gran cantidad de peces y la presión de la depredación por peces o invertebrados influye sobre la estructura de la comunidad del zooplancton (Kwan-Hyeon & Hanazato, 2003; Winder *et al.*, 2003), probablemente esta variable explique el comportamiento encontrado. En fría se presentó únicamente la especie *A. americanus*, Cervantes-Martínez (2005) menciona que, a pesar de existir una disponibilidad de nutrimentos, la producción fitoplanctónica es limitada por las

bajas temperaturas, asumiendo que esta condición limita la riqueza de especies. Por otra parte, en secas se registraron dos especies, *A. americanus* y *E. chihuahuensis*, lo cual concuerda con lo reportado por Mendoza-Chávez (2016) y con lo mencionado por Gutiérrez-Aguirre (2002), ya que en algunos sistemas acuáticos pueden coexistir hasta tres especies de copépodos cyclopoides. Probablemente una mayor cantidad de alimento, atribuible a una mayor producción fotosintética por la acción de mayores temperaturas (soportado por una mayor temperatura en secas) (Sommer *et al.*, 1986), explica la presencia de las especies aquí reportadas.

En el caso de Presita, se pudo observar en campo que probablemente se haya convertido en sitio de descarga de desechos industriales; sin embargo, este sistema se eligió por presentar concentraciones mínimas de arsénico y con base en ello se determinó como un sitio control, manteniéndose como tal debido al interés por continuar estudiando este sitio tanto a nivel ambiental como biológico. En este estudio no se registraron especies de copépodos para este sitio. Cabe resaltar que Mendoza-Chávez (2016) reportó en el año 2015 la presencia de la especie de cyclopoide *Eucyclops leptacanthus* Kiefer, 1956 así como las especies de cladóceros *Alona glabra* Sars, 1901, *Simocephalus punctatus* Orlova-Bienkowskaja 1998 y *Pleuroxus quasidenticulatus* Smirnov 1996, mientras que para el 2016 únicamente se registraron dichos cladóceros. Esos cambios en la estructura de la comunidad, que incluyen la desaparición de especies, son un indicador de un proceso rápido e intenso de eutrofización (Arcifa, 1984; Pinto-Coelho, 1998; Matsumura-Tundisi y Tundisi, 2003). Lo anterior concuerda con los trabajos realizados por Poi de Neiff *et. al.* (1999) y Fabián y Cruz-Pizarro (1997) en cuerpos de agua eutrofizados, en los cuales la riqueza y la abundancia fueron muy escasas, siendo una característica de estos ambientes.

Abundancia de copépodos

En Club de Tiro, la especie *P. chiltoni*, fue la más dominante tanto espacial como temporalmente debido a que al vivir en un ambiente extremo con concentraciones letales de arsénico no tiene un depredador natural; por lo tanto, la competencia con otras especies de zooplancton e invertebrados probablemente no resulta un problema para esta especie. Así mismo, se pudo observar que durante todo el estudio la etapa adulta fue la que mayor abundancia presentó a comparación de los copepoditos y

nauplios, esto se debe a que las formas adultas son más resistentes a la acción tóxica de metales pesados como el arsénico (Gagneten, 2008).

Cabe resaltar que el mayor periodo de abundancias en Club de Tiro se observó en seca, coincidiendo con la temperatura del agua más alta registrada en esa temporada (21° C), esto concuerda con lo mencionado por Ordóñez-López y Ornelas-Roa (2003): las abundancias de copépodos se incrementan con la temperatura. Así mismo, al respecto se han demostrado las relaciones entre temperatura, la tasa de alimentación y la calidad de alimento natural en la producción de huevos, *P. chiltoni* durante las tres épocas presentó hembras con huevo, produciendo una mayor y constante descendencia.

En el caso de Laguna, para lluvia la abundancia registrada fue casi nula, únicamente hubo una abundancia de 0.24 in/l correspondiente a nauplios. Como se discutió anteriormente, al haber presencia de peces probablemente hubo un efecto de depredación sobre la comunidad de copépodos, con lo cual se podría explicar el comportamiento en esa temporada.

En época de fría, la abundancia fue dominante en estadio nauplio con 23.5 ind/l, seguido de los copepoditos con 1.46 ind/l y adultos de la especie *A. americanus* con 0.79 ind/l, mostrándose una tendencia de crecimiento en la comunidad y a diferencia de la temporada de lluvia, en fría no se encontraron peces. La mayor abundancia de nauplios puede ser atribuida a que se ha reportado que los estadios naupliares presentan una mayor esperanza de vida a bajos niveles de alimento que para las especies adultas son insuficientes (García *et al.*, 2011). Por otra parte, estudios han demostrado que los nauplios, copepoditos y adultos responden de manera diferente a la disponibilidad de alimento. Así mismo, los nauplios tienden a ser sensibles a cambios de temperatura (McKinnon & Duggan, 2003; Lin *et al.*, 2013). En el presente estudio, la abundancia más alta de nauplios (23.5 ind/l) se registró a una temperatura de 15.3 °C en el agua, probablemente, esta variable explique dicho comportamiento.

En lo que respecta a secas, se observó una disminución en las abundancias de nauplios (6.63 ind/l) y un ligero aumento en los copépodos adultos (1.7 ind/l) dentro de los cuales se encontraban coexistiendo dos especies, *A. americanus* y *E. chihuahuensis*, pudiendo reflejar una competencia por recursos alimenticios (Conde-Porcuna *et al.*, 2004) debido a que, a medida que se produce un enriquecimiento de nutrientes, la tendencia es hacia una mayor biomasa, una mayor tasa de producción y reducción o cambios en la diversidad de especies (Hutchinson, 1999).

El sitio Presita fue el que presentó las menores abundancias debido a que sus valores estuvieron por debajo de 1 ind/l en cada una de las tres épocas climáticas. Lo anterior es diferente a lo reportado por Mendoza-Chávez (2016), ya que para el año 2015 encontró una abundancia de 5.5 ind/l. La abundancia de zooplancton en este sitio probablemente se encuentre influenciada por los cambios en el estado trófico del ecosistema tal y como se mencionó anteriormente.

Tallas y proporción hembras-machos

Las diferencias o similitudes en el tamaño del cuerpo de los individuos entre los cuerpos de agua son difíciles de explicar debido a la ausencia de información por parte de otras localidades donde las especies han sido estudiadas. En las especies de zooplancton, el tamaño del cuerpo es un factor determinante en la competencia por los recursos alimenticios, siendo la temperatura y la disponibilidad de alimentos los principales factores que regulan la talla (Chisholm y Roff, 1990; Escribano y McLaren, 1992) No obstante, se encuentran otros como la hipótesis de depredación tamaño-selectiva y el estado trófico del agua (Bays y Crisman, 1983; Liljendahl-Nurminen *et al.*, 2003, Winder *et al.*, 2003).

En Club de Tiro, el promedio de tallas de la especie *P. chiltoni* en lluvia fue de 639 ± 43.2 μm para hembras y 650 ± 36.7 μm para machos, mientras que en fría fue de 607 ± 28.3 μm en hembras y 617 ± 40.6 en machos. Las tallas se mantuvieron dentro de lo reportado por Boxshall y Karaytug (1998), cuyos rangos fueron de 556-857 μm en hembras y 531-751 μm en machos.

A lo largo del estudio las tallas de *P. chiltoni* parecieron constantes, probablemente factores como la temperatura y la disponibilidad de alimentos explican este comportamiento.

En Laguna, el promedio de tallas de *A. americanus* fue de $884 \pm 46 \mu\text{m}$ para hembras, encontrándose por debajo de lo reportado por Miracle *et al.* (2013) y por García-Chicote *et al.* (2007), este último en condiciones de cultivo para el mismo género. Por otra parte, los machos presentaron una talla promedio de $866 \pm 54 \mu\text{m}$, lo cual se mantuvo dentro de lo observado por García-Chicote *et al.* (2007). La especie *E. chihuahuensis* presentó una talla promedio de $736 \pm 75 \mu\text{m}$, siendo mayor a la descrita por Suárez-Morales y Walsh (2009).

Se observó que los machos son más pequeños que las hembras, siendo esto un hecho completamente normal en las comunidades de copépodos (Cervantes, Martínez, 2005). Si bien los sistemas oligotróficos tienden a presentar organismos de mayor talla, mientras que en los eutróficos predominan las tallas menores (Bays y Crisman, 1983) y las zonas tropicales contienen más taxas y sus especies son más pequeñas a comparación de las comunidades en zonas templadas (Lewis, 1996), se pudo contemplar que para las hembras de la especie *A. americanus* en Laguna las tallas son menores a las reportadas en otros estudios y en el caso de *E. chihuahuensis* las tallas fueron mayores a las reportadas, esos cambios de talla de los copépodos de zonas templadas se han atribuido a las variaciones de temperatura y alimento disponible, mientras que muchas especies no muestran cambios estacionales en las zonas tropicales (Hopcroft *et al.*, 1998).

De acuerdo al principio de Fisher, se espera que la proporción hembras-machos sea 1:1 en un ambiente natural (Hirst *et al.*, 2010); no obstante, comúnmente la proporción se encuentra sesgada, con las hembras superando en número a los machos (Hirst y Kiørboe, 2002; Kiørboe, 2006). En este estudio, ese sesgo se presenta, debido a que las hembras sobrepasaron a los machos durante las tres épocas climáticas. Lo anterior se atribuye probablemente a tres factores: 1) ambientales, 2) longevidad y 3) depredación; así mismo, no se descarta un posible fenómeno de canibalismo debido a que se ha reportado este comportamiento en individuos del género *Acanthocyclops* (García-Chicote *et al.*, 2007).

Parámetros físicos y químicos

Los sitios estudiados corresponden a cuerpos de agua superficial, que propician las condiciones necesarias para encontrar zooplancton, como lo son: formación de columnas de agua de baja corriente y/o sistemas de agua prácticamente estancada (Cervantes-Martínez, 2005). Los parámetros físicos y químicos varían de acuerdo al tipo de cuerpo acuático, así como de su origen y ubicación geográfica (Sommer *et al.*, 1986; Aranguren *et al.*, 2014).

Lewis (1987) y Cervantes-Martínez (2005) mencionan que la temperatura del agua es el resultado del efecto de la temperatura ambiental. A latitudes templadas, los cambios estacionales en la temperatura del agua se encuentran asociados a la mezcla estacional y a la estratificación (Lewis, 1996). La temperatura es un factor determinante en la dinámica de las comunidades del zooplancton (Yoshida *et al.*, 2001); por ejemplo, en Club de Tiro probablemente *P. chiltoni* dependió de los cambios de esta variable debido a que a mayor temperatura presentó una mayor abundancia.

Con respecto a la concentración de oxígeno disuelto en el agua, esta guarda una relación inversa con la temperatura (Lewis, 1987), lo cual explica el comportamiento de esta variable en Presita ya que en la época de fría se encontró el valor más alto de concentración (15.8 mg/l). Para el caso de Laguna y Club de Tiro, ese hecho no explica el comportamiento de esta variable, en ambos casos se puede observar un gradiente de disminución de lluvia a seca, estas oscilaciones pueden ser explicadas más por efectos biológicos (respiración-fotosíntesis) que por físicos. Como se discutió anteriormente, las mayores abundancias para esos sitios se reportaron en seca, temporada en la cual las condiciones fueron casi anóxicas. Cervantes-Martínez (2005) menciona que la reducción anormal de oxígeno es producto del consumo por parte de los organismos acuáticos que lo utilizan para su respiración y también por los procesos de descomposición.

Para el pH, la mayoría de los valores obtenidos son principalmente cercanos a la neutralidad y ligeramente básicos, esto es característico de los cuerpos de agua de paisajes calcáreos debido a la disolución de las formaciones carbonatadas que la conforman (Bibiano *et al.*, 2015); no obstante, el sitio Club de Tiro presentó los menores valores en las tres épocas climáticas.

Los valores ligeramente básicos encontrados en Laguna y Presita pueden estar asociados a sistemas con una mayor producción fotosintética evidenciado además por otras variables ambientales como el oxígeno disuelto (Laguna y Presita presentaron los valores de oxígeno más elevado), mientras que Club de Tiro presentó valores menores debido a su menor producción, evidenciado por su menor concentración de oxígeno (Schmitter-Soto et al., 2002; Cervantes-Martínez, 2005); por otra parte, la descomposición de materia orgánica ejerce una influencia en el pH (Massol, 2002), al ser Club de Tiro un sitio muy somero rápidamente puede llegar la materia orgánica al suelo y comenzar a descomponerse y afectar el comportamiento de esta variable.

La conductividad eléctrica registrada en este trabajo es baja (2345- 3475 $\mu\text{S}/\text{cm}^3$) en comparación con lo reportado en otros cuerpos de agua de la región centro- norte del país, donde se han registrado valores por encima de los 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}^3$, característico de sistemas acuáticos donde los procesos de evaporación y precipitación de sales son dominantes (Alcocer y Escobar, 1996). La baja concentración de iones en los sistemas se puede explicar por: 1) la precipitación debido a que provoca una mayor dilución de los iones presentes en el agua (Cervantes-Martínez, 2005), 2) la evaporación ya que zonas expuestas a altas tasas de evaporación y menor precipitación tendrán un mayor contenido iónico (Kalf, 2002), 3) las características hidrológicas de cada sistema y 4) la geología del lugar, debido a que Matehuala consta de calizas azules lutitas y calizas lutíticas del jurásico y del cretácico en donde resultan procesos de disolución-precipitación de calcita y yeso. (García-Gutiérrez, 1967; Mendoza-Chávez, 2016).

En función de la salinidad, los sistemas estudiados se clasifican como oligohalinos (Massol, 2002) debido a que los valores encontrados (1.3- 1.8 psu) son típicos de estos sistemas acuáticos.

Con respecto a las concentraciones de arsénico determinadas durante este estudio, estas reflejan el comportamiento encontrado en los trabajos de Martínez-Villegas *et al.* (2013) y Mendoza-Chávez (2016), en los cuales las concentraciones reportadas oscilaron entre <0.1 y 53.23 mg/l.

La contaminación por arsénico proviene de arseniatos de calcio, siendo el calcio el catión dominante en el área de estudio (Martínez-Villegas *et al.*, 2013). La concentración de As en los cuerpos de agua se encuentra posiblemente controlada en

gran medida por procesos de interacción sólido-solución, esto a través de dos procesos geoquímicos: 1) reacciones de adsorción-desorción y 2) reacciones de precipitación- disolución de la fase sólida (Lillo, 2003).

En Laguna, los valores de arsénico tuvieron una tendencia de aumento de la época de lluvia hacía la época de seca, una posible explicación a la evolución de los niveles encontrados puede rescindir en las reacciones hidrogeoquímicas, gobernadas principalmente por el potencial redox (Eh) y el pH, determinando la oxidación del arsénico y, por lo tanto, su movilidad (Manning y Goldberg, 1997; Lillo, 2003). Como se discutió anteriormente, el pH en Laguna generalmente fue ligeramente básico (8.1-9.1), aunado con valores de Eh entre 161 y 361 mV; al llevar estos datos a un diagrama de equilibrio Eh/pH, se observa una gran capacidad del As para ser retenido en fase sólida, lo cual hace suponer que la concentración de arsénico en agua está regulada por procesos de adsorción-desorción, responsables de la solubilización o retención del metaloide (Masscheleyn *et al.*, 1991; Reynolds *et al.*, 1999). La condición de Eh/pH indica que el nivel de arsénico en disolución puede estar regulado por reacciones de equilibrio en disolución y arsénico fuertemente adsorbido (Revuelta *et al.*, 2003).

Para Club de Tiro, las concentraciones tan altas podrían ser interpretadas como consecuencia de una menor capacidad de dilución en los cuerpos de agua por su menor caudal (Gagneten, 2008). Por otra parte, entre otros procesos que controlarían la concentración son: 1) la precipitación de este elemento con calcita y yeso y 2) la adsorción-desorción de arseniatos de calcio. En ese sentido, Martínez-Villegas *et al.* (2013) mencionan que la disolución de arseniatos de calcio libera las concentraciones más altas de arsénico derivado de altas concentraciones de sulfatos y fosfatos presentes en el agua.

Los orígenes del arsénico pueden ser diversos; por ejemplo, para el caso de Laguna, el agua mostró una tendencia de alcalinidad, con lo cual se infiere que el arsénico proviene de descargas industriales y no de la solubilización a partir de sedimentos de fondos en la columna de agua (Gagneten, 2008), lo anterior se fundamenta en que el agua subterránea y las lluvias estacionales son los principales agentes de disolución en el área minera, descargando agua altamente contaminada hacia Club de Tiro la cual fluye hacía Laguna (Martínez-Villegas *et al.*, 2013).

En cuanto a la normatividad, las concentraciones determinadas en Club de Tiro permanecieron decenas de veces por encima del límite máximo permisible (0.2 mg/l) para la conservación de la vida acuática (SEMARNAT, 1996).

Así mismo, se encontraron por encima de lo establecido (0.05 mg/l) en la NOM-127-SSA1-1994 y por encima de la concentración letal de arsénico en zooplancton (3 mg/l) determinada por Chen *et al.* (1999). Para Laguna, la tendencia es la misma, sus valores se encontraron por encima los límites establecidos en el marco normativo. Finalmente, en Presita los valores encontrados para lluvia y fría estuvieron por debajo del límite de detección. En el caso de seca, la concentración fue de 0.2 mg/l, encontrándose en el límite para la conservación de la vida acuática y por debajo de la concentración letal de zooplancton y de la NOM-127-SSA1-1994.

CONCLUSIONES

En este estudio fue posible observar de manera general algunos de los cambios que ocurren en la comunidad de copépodos a nivel espacial y temporal habitando cuerpos de agua con diferentes concentraciones de arsénico, siendo este uno de los primeros trabajos en este sentido.

Se concluye que:

A) El número de especies registradas fue similar en la mayoría de los sitios respecto al estudio previo realizado en el 2016. En Laguna se encontraron las especies *A. americanus* y *E. chihuahuensis*, esta última mostrando una posible influencia estacional debido a que únicamente se encontraron individuos adultos en temporada de secas. En Club de Tiro se registró la especie *P. chiltoni*, la cual fue una constante al encontrarse en las tres temporadas estudiadas. Presita no presentó ninguna especie, sugiriendo con base en las observaciones en campo y los resultados encontrados la hipótesis de que el sitio se encuentra en un posible proceso de hiper-eutrofización debido a que anteriormente se habían registrado especies (copépodo y cladóceros), aunado a la ausencia de vertebrados e invertebrados que pudieran ejercer una presión en la comunidad.

B) Se observó una relación proporcional entre la abundancia de copépodos con respecto a la concentración de arsénico; es decir, a mayor concentración de As mayor concentración de copépodos. Caso contrario a la riqueza, mayor riqueza menor concentración de As.

C) Probablemente y dadas las características de los sitios en Laguna y Club de Tiro, el comportamiento de la estructura de tallas se podría atribuir a las variaciones de temperatura y alimento disponible.

D) Aparentemente el arsénico no ejerce una presión sobre la comunidad de copépodos que induzca cambios en ella; por lo tanto, es evidente que las pocas especies que logran mantenerse en estas condiciones han logrado desarrollar mecanismos de resistencia, tal es el caso de los estadios larvarios de copépodos y adultos de las especies *Acanthocyclops americanus*, *Eucyclops chihuahuensis* y sobre

todo, *Paracyclops chiltoni*, siendo esta última la especie de la que se registraron machos y hembras con mayor frecuencia en concentraciones >50 mg/l As.

E) Las concentraciones de arsénico en agua reflejan la tendencia mostrada en trabajos previos, su origen y presencia en los sistemas acuáticos mencionados probablemente se deba a la disolución o desorción de los minerales presentes en el acuífero combinado con los bajos caudales. Los sitios Laguna y Club de Tiro sobrepasan la normatividad en cuanto a la protección de la vida acuática, el consumo de agua potable y la concentración letal en zooplancton.

F) Los datos aquí presentados cubren de manera general las tres épocas climáticas registradas en la zona centro-norte del país. Futuros estudios son necesarios para conocer más a detalle la evolución a largo plazo de los aspectos ecológicos de los copépodos cyclopoides y determinar que factores físicos, químicos y biológicos ejercen una mayor influencia sobre ellos.

LITERATURA CITADA

- Alcocer, A. y Escobar, E. 1996. Limnological regionalization of Mexico. *Lakes and Reservoirs: Research and Management* 2: 55-69.
- Antezana, R. C. H., Ostoic, F. R. y Ramos, A. G. s.f. [http://www.pnuma.org/agua-miaac/Curso%20Regional%20MIAAC/Conferencias/Dia%205%20\(14-agosto-2010\)/MIAAC%20PNUMA%20PAN%20AGO%2010%20MAX/BIBLIOGRAFIA/indicadoresBiologicosCalidadAgua.pdf](http://www.pnuma.org/agua-miaac/Curso%20Regional%20MIAAC/Conferencias/Dia%205%20(14-agosto-2010)/MIAAC%20PNUMA%20PAN%20AGO%2010%20MAX/BIBLIOGRAFIA/indicadoresBiologicosCalidadAgua.pdf) . Indicadores biológicos de calidad del agua. Fecha de consulta: 21 de febrero de 2017.
- Aranguren-Riaño, N. J. y J.D. Monroy-González. 2014. Respuesta del zooplancton en un sistema tropical (embalse la chapa, Colombia). *Acta Biológica Colombiana* 19(2): 281-290.
- Arcifa, M. S. 1984. Zooplankton composition of ten reservoirs in southern Brazil. *Hydrobiologia* 113(1): 137-145.
- Armienta MA, Amat PD, Larios T, López DL. 2008. América Central y México. En: Bundschuh J, Carrera AP, Litter M (Eds.). *Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana* (pp. 187-210). Buenos Aires, Argentina: Editorial Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.
- Baudouin, M. F., y Scoppa, P. 1974. Acute toxicity of various metals to freshwater zooplankton. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 12(6): 745–751.
- Bays J. S y T. L. Crisman, 1983. Zooplankton and trophic state relationships in Florida Lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 40: 1813-1819.
- Begon, M., Townsend, C. R. y Harper, J. L. 2006. Ecology: from individuals to ecosystems (4th ed). Malden, MA: Blackwell Pub, Malden, MA. 759 p.

- Bibiano, L., Gárfias, J. y Llanos, H. 2015. Hidrogeoquímica y procesos naturales de ablandamiento del agua subterránea en sistemas cársticos. *Tecnología y Ciencias del Agua* 6(3): 57-78.
- Boxshall, G. A., y Karaytuğ, S. 1998. The Paracyclops fimbriatus-complex (Copepoda, Cyclopoida): a revision. *Zoosystema* 20(4): 563-602.
- Briones-Gallardo, R., y Razo-Soto, I. 2008. Contaminación de aguas naturales por arsénico asociado a la actividad minero-metalúrgica: caso de estudio en San Luis Potosí, México (pp. 181–189). En *Memorias del Congreso Internacional en Gestión Sostenible del Agua: Reutilización, Tratamiento y Evaluación de la Calidad (CD)*. Medellín, Colombia.
- Bundschuh J, Nicolli HB, Blanco M del C, Blarasin M, Farías SS, Cumbal L. 2008. Distribución de arsénico en la región sudamericana. En: Bundschuh J, Pérez-Carrera A, Litter MI. (Eds). *Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana* (pp. 137-186). Buenos Aires, Argentina: Editorial Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.
- Caumette, G., Koch, I., Estrada, E. y Reimer, K. J. 2011. Arsenic Speciation in Plankton Organisms from Contaminated Lakes: Transformations at the Base of the Freshwater Food Chain. *Environmental Science & Technology* 45(23): 9917–9923.
- CEFIM. s.f. Monografías de los Municipios de México: Matehuala, San Luis Potosí. Coordinación Estatal para el Fortalecimiento Institucional de los Municipios.
- Cervantes-Martínez, A. 2005. Análisis limnológicos de dos sistemas cársticos (cenotes) de la Península de Yucatán con énfasis en la variación espacial y temporal del zooplancton. Tesis de Doctoral. El Colegio de la Frontera Sur, Chetumal, México. 171p.

- Cervantes-Martínez, A. y Gutiérrez-Aguirre, M. A. 2011. Copépodos de agua dulce. En Pozo, C., Armijo Canto, N. y Calmé, S. (Eds). Riqueza Biológica de Quintana Roo: Un análisis para su conservación, Tomo 2 (pp. 125-128). El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (PPD). México, D. F.
- Cervantes-Martínez, A., Gutiérrez-Aguirre, M. A., Delgado-Blas V. H. y Ruíz-Ramírez, J. D. 2012. Especies de zooplancton dulceacuícola de Cozumel. Universidad de Quintana Roo (UQROO), 59 p.
- Challenger, A. y J. Soberón. 2008. Los ecosistemas terrestres, en Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Conabio, México, pp. 87-108.
- Chen, C.Y., Sillett, K.B., Folt, C.L., Whittemore, S.L. y Barchowsky, A. 1999. Molecular and demographic measures of arsenic stress in *Daphnia pulex*. *Hydrobiología* 401: 229–238.
- Chisholm, I. A. y J. C. Roff. 1990. Size-weight relationship and biomass of tropical neritic copepods off Kingston, Jamaica. *Marine Biology* 106: 71-77.
- Conde-Porcuna, J.M., Ramos-Rodríguez, E. y Morales-Baquero, R. 2004. El zooplancton como integrante de la estructura trófica de los ecosistemas lénticos. *Ecosistemas* 13(2): 23-29.
- Daniel, W. W. 1990. Bioestadística. México D. F., México. Limusa. 667 p.
- Duarte, N. E. S. y Marini, M. E. E. J. 2017. Evaluación de impacto ambiental por metales y metaloides. *Biotecnia* 19(1): 10-16.
- Elías-Gutiérrez, M., Suárez-Morales, E., Gutiérrez-Aguirre, M. A., Silva-Briano, M., Granados-Ramírez, J. y Garfías-Espejo, T. 2008. Cladocera y copepoda de las aguas continentales de México guía ilustrada (No. EE/595.340972 C5). 322 p.

- Escribano, R. y McLaren, I. A. 1992. Influence of food and temperature on lengths and weights of marine copepods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 159(1): 77-88.
- Espinosa-Muñoz, S. 2011. Simulación solar para el diseño de vivienda de interés social en la Zona Media y Zona Centro de San Luis Potosí. Facultad del Hábitat. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. *Hábitat sustentable* 1(1): 7-15.
- Fabián, D. y Cruz-Pizarro, L. 1997. Variaciones espaciales y temporales del zooplancton en un lago monomítico eutrófico (Lago Ton-Ton, Uruguay). *limnetica* 13: 55-68.
- Fernández de Puellez, L. 2015. http://sea-entomologia.org/IDE@/revista_89.pdf. Orden Calanoida. Revista IDE@-SEA, 89: 1-27. Fecha de consulta: 17 de Mayo de 2017.
- Fernández-Turiel, J., Galindo, G., Parada, M., Gimeno, D., García-Valles, M. y Saavedra, J. 2005. Estado actual del conocimiento sobre el arsénico en el agua de Argentina y Chile: origen, movilidad y tratamiento. En Galindo, G., Turiel, J. L. F., Parada, M. Á. y Torrente, D. G. (Eds). *Arsénico en aguas: origen, movilidad y tratamiento* (pp. 1-22). Taller II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea.
- Gagneten, A. M. 2005. Estrategias de historia de vida de copépodos marinos y dulceacuícolas, con especial referencia al estado de diapausa. Análisis revisivo. *FABICIB* 3(1): 173-182.
- Gagneten, A. M. 2008. <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/tesis/handle/11185/87> . Respuestas del zooplancton a la contaminación por cromo en la cuenca del río Salado inferior (Santa Fe, Argentina). Fecha de consulta: 12 de junio de 2017.
- García-Chicote, J., Rojo García-Morato, C., Alacreu, R., y Antonia, M. 2007. Alimentación de *Acanthocyclops robustus*: Un caso de canibalismo. *limnetica*, 26(2): 265-276.

- García-Gutiérrez, C. 1967. Geología y paragenesis del distrito minero de Matehuala, San Luis Potosí, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 30(1): 29-61.
- García, C. E., Nandini, S. y Sarma, S. S. S. 2011. Demographic characteristics of the copepod *Acanthocyclops americanus* (Sars, 1863)(Copepoda: Cyclopoida) fed mixed algal (*Scenedesmus acutus*)-rotifer (*Brachionus havanaensis*) diet. *Hydrobiologia* 666(1): 59-69.
- Gunduz, O., Simsek, C. y Hasozbek, A. 2010. Arsenic Pollution in the Groundwater of Simav Plain, Turkey: Its Impact on Water Quality and Human Health. *Water, Air, and Soil Pollution* 205(1-4): 43-62.
- Gutiérrez-Aguirre, M. A. 2002. Distribución y taxonomía de *Mesocyclops* G.O. Sars (Copepoda, Cyclopidae) en el sureste mexicano y América tropical. Tesis de Doctorado. , El Colegio de la Frontera Sur, Chetumal, México. 227 p.
- Gutiérrez-Aguirre, M. A., Suárez-Morales, E. y Cervantes-Martínez, A. 2006. Distribución de las especies de *Mesocyclops* (Copepoda: Cyclopoida) en el sureste mexicano y región norte de Guatemala. *Hidrobiológica* 16(3): 259-265.
- Gutiérrez, M. F. y Gagneten, A. M. 2011. Efecto de los metales sobre microcrustáceos de agua dulce: Avances metodológicos y potencialidad de cladóceros y copépodos como organismos test. *Revista Peruana de Biología* 18(3): 389-396.
- H. Ayuntamiento de Matehuala. 2016. Matehuala, Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. Centro de desarrollo municipal de la secretaría de desarrollo social del gobierno del estado de San Luis Potosí, San Luis Potosí.
- Hirst, A. G., Bonnet, D., Conway, D. V. P. y Kiørboe, T. (2010). Does predation controls adult sex ratios and longevities in marine pelagic copepods?. *Limnology and Oceanography* 55(5): 2193-2206.

- Hopcroft, R. R., J. C. Roff y D. Lombard. 1998. Production of tropical copepods in Kingston Harbour, Jamaica: the importance of small species. *Marine Biology* 130: 593-604.
- Hutchinson, T.C. 1999. *Ecología* (pp. 303-336). En Henry, J. G., Heinke, G. W. y Escalona, H. J. (1999). Ingeniería ambiental. Pearson Educación. 647 p.
- INEGI. 2007. Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, 136 p.
- Kalff J. 2002. Limnology. Prentice Hall. USA. 592 p.
- Kwan-Hyeon Ch. y T. Hanazato. 2003. Vulnerability of cladoceran species to predation by copepods *Mesocyclops leuckarti*: laboratory observations on the behavioral interactions between predator and prey. *Freshwater Biology* 48: 476-484.
- Lara Del Río, A. 2015. Evaluación de acumulación de arsénico en cabello de poblaciones expuestas a este contaminante en el Complejo Hidráulico Matehuala-Cerrito Blanco. Tesis de Maestría. IPICYT, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., San Luis Potosí, SLP.
- Lewis Jr, W. M. 1987. Tropical limnology. *Annual Review of Ecology and Systematics* 18(1): 159-184.
- Lewis Jr, W. M. 1996. Tropical lakes: how latitude makes a difference. *Perspectives in tropical limnology* 4364.
- Liljendahl-Nurminen A., Horppila J., Malinen T., Eloranta P., Vinni M., Alajärvi E. y Valtonen Saara. 2003. The supremacy of invertebrate predators over fish-factors behind the unconventional seasonal dynamics of cladocerans in Lake Hiidenvensi. *Archiv Für Hydrobiologie* 158: 75-96.
- Lillo, J. 2003. Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas. Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos.

- Lin, K. Y., Sastri, A. R., Gong, G. C. y Hsieh, C. H. (2013). Copepod community growth rates in relation to body size, temperature, and food availability in the East China Sea: a test of metabolic theory of ecology. *Biogeosciences* 10(3): 1877-1892.
- Manning, B. A. y Goldberg, S. 1997. Arsenic (III) and arsenic (V) adsorption on three California soils. *Soil Science* 162(12): 886-895.
- Martínez-Villegas, N., Briones-Gallardo, R., Ramos-Leal, J. A., Avalos-Borja, M., Castañón-Sandoval, A. D., Razo-Flores, E. y Villalobos, M. 2013. Arsenic mobility controlled by solid calcium arsenates: A case study in Mexico showcasing a potentially widespread environmental problem. *Environmental Pollution* 176: 114–122.
- Masscheleyn, P.H; DeLaune, R.D. y Patrick, W.H. 1991. Effect of redox potential and pH on arsenic speciation and solubility in a contaminated soil. *Environmental Science and Technology* 25: 1414-1419.
- Matsumura-Tundisi, T. y Tundisi, J. G. 2003. Calanoida (Copepoda) species composition changes in the reservoirs of São Paulo State (Brazil) in the last twenty years. *Hydrobiologia* 504(1-3): 215-222.
- McKinnon, A. D. y Duggan, S. 2003. Summer copepod production in subtropical waters adjacent to Australia's North West Cape. *Marine Biology* 143(5): 897-907.
- Mendoza Chávez, Y. J. 2016. Especies de zooplancton presentes en agua contaminada con arsénico en Matehuala, San Luis Potosí, México. Tesis de Maestría. IPICYT, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., San Luis Potosí, SLP.
- Mendoza, L. A., Razo, L. M. D., Barbier, O., Saldaña, M. C. M., González, F. J. A., Juárez, F. J. y Sánchez, J. L. R. 2012. Potable Water Pollution with Heavy Metals, Arsenic, and Fluorides and Chronic Kidney Disease in Infant Population of Aguascalientes. En Ú. Oswald Spring (Ed.), *Water Resources in Mexico* (Vol. 7, pp. 231–238). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Mercado-Salas N. F. y E. Suárez-Morales. 2011. Morfología, diversidad y distribución de los Cyclopoida (Copepoda) de zonas áridas del centro-norte de México. I. Cyclopinae. *Hidrobiológica* 21(1): 1-25.
- Mercado-Salas N. F. y E. Suárez-Morales. 2012. Morfología, diversidad y distribución de los Cyclopoida (Copepoda) de zonas áridas del centro-norte de México. II. Eucyclopinae y análisis biogeográfico. *Hidrobiológica* 22(2): 99-124.
- Mercado-Salas, N. F. y E. Suárez-Morales. 2009. A new species and illustrated records of *Paracyclops* Claus, 1893 (Copepoda: Cyclopoida: Cyclopinae) from Mexico. *Journal of Natural History* 43(45-46): 2789-2808.
- Miracle, M. R., Alekseev, V., Monchenko, V., Sentandreu, V. y Vicente, E. 2013. Molecular-genetic-based contribution to the taxonomy of the *Acanthocyclops robustus* group. *Journal of Natural History* 47(5-12): 863-888.
- Montoya, R., Airam, E., Montañez Hernández, L. E., Luévanos Escareño, M. P. y Balagurusamy, N. 2015. Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana* 33(2): 103–118.
- NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación, México.
- Ordóñez-López, U. y Ornelas-Roa, M. 2003. Variaciones de la comunidad de copépodos plánticos en el gradiente estuarino-costero de Celestún, Yucatán, México. *Hidrobiológica* 13 (3): 231-238.
- Ordoñez-López, U., Ornela-Roa, M., Uicab-Sabido, R. y Escamilla-Sánchez, J. 2010. Fauna zooplanctónica en el litoral yucateco (pp. 150-153). En Durán R. & M. Méndez (Eds). Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. 496 p.
- Patel, K. S., Shrivastava, K., Brandt, R., Jakubowski, N., Corns, W. y Hoffmann, P. 2005. Arsenic contamination in water, soil, sediment and rice of central India. *Environmental Geochemistry and Health* 27(2): 131–145.

- Pinto-Coelho, R. M. 1998. Effects of eutrophication on seasonal patterns of mesozooplankton in a tropical reservoir: a 4-year study in Pampulha Lake, Brazil. *Freshwater Biology* 40(1): 159-173.
- Poi de Neiff, A. S., Canon Verón, M. y Frutos, S. M. 1999. Relaciones tróficas entre peces, macroinvertebrados y zooplancton en una laguna eutrófica (Corrientes, Argentina). *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas de la UNNE*.
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F. y Monroy, M. 2004. Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution* 152(1): 129–152.
- Revuelta, C. C., Álvarez-Benedí, J., Benítez, M. A., Diez, P. M. y Rodríguez, S. B. 2003. Contaminación por arsénico en aguas subterráneas en la provincia de Valladolid: variaciones estacionales. *Estudios de la zona no saturada del suelo*, 1.
- Reynolds, J.G; Naylor, D.V. y Fenford, S.E. 1999. Arsenic sorption in phosphate amended soils during flooding and subsequent aeration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1149-1156.
- Rosas, I., Belmont, R., Armienta, A. y Baez, A. 1999. Arsenic concentrations in water, soil, milk and forage in Comarca Lagunera, Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution* 112(1–2): 133–149.
- Schmitter-Soto J.J., E. Escobar-Briones., J. Alcocer., E. Suárez-Morales., M. Elías-Gutiérrez y L. E. Marín. 2002. Los cenotes de la Península de Yucatán. En: G. De la Lanza-Espino y J. L. García-Calderón (comps.). *Lagos y Presas de México* (pp. 337-38). AGT, México, D. F.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1996. NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario Oficial de la Federación*, México.

- Sommer, U., Maciej, G., Lampert, W. y A. Duncan. 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Arch. Hydrobiol.* 106: 433–471.
- Suárez-Morales, E. y Walsh E. 2009. Two new species of Eucyclops Claus (Copepoda: Cyclopoida) from the Chihuahuan Desert with a redescription of *E. pseudoensifer* Dussart. *Zootaxa* 2206: 1–16.
- Suárez-Morales, E. y N. Mercado-Salas. 2011. Diversidad y Distribución de los copépodos (Cyclopoida) de las zonas áridas del Centro-Norte de México. El Colegio de la Frontera Sur-Unidad Chetumal (ECOSUR). Departamento de Ecología y Sistemática Acuática. Dirección de Conservación de la Biodiversidad. Laboratorio de Zooplancton. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. GT034. México, D.F.
- Winder, M., H. R. Burgi y L. Spaak. 2003. Mechanisms regulating zooplankton populations in a high-mountain lake. *Freshwater Biology* 48: 795-809.
- Yoshida, T., Kagami, M., Bahadur Gurung, T. y J. Urabe. 2001. Seasonal succession of zooplankton in the north basin of Lake Biwa. *Aquat. Ecol.* 35: 19–29.

ANEXOS

Anexo 1

Tabla 4. Temperatura media mensual (°C) en Matehuala, San Luis Potosí durante 1979-2011

Estación climatológica Zaragoza, Matehuala San Luis Potosí. Temperatura media mensual (°C) 1979-2011												
Año	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1979	0	15.6	18	18.7	20.8	20	19.5	17.5	16.1	17.1	12.2	14
1980	14.2	14.5	16.6	16.9	21	19	18.3	18.1	18.1	14.8	15.6	10.1
1981	7.7	11.6	16.1	17.05	19.1	17.7	18.2	18.2	18.4	18.9	14.8	14.5
1982	12.9	14.6	17.3	20.3	19.3	21.1	18.1	18.2	17.8	17.2	14.1	12.8
1983	8.9	10.5	14.6	16.8	21.1	20.7	16.5	18	18.1	16.5	15.5	12.6
1984	13	12.7	15.3	19	18.5	20.5	16.6	16.8	16.1	18.3	14.6	12
1985	12.11	12.4	17.7	14.5	18.3	17.1	15.9	0	19.1	15.8	13.8	13.1
1986	12.8	11.99	13.8	17.4	18.3	16.9	0	0	0	0	0	0
1987	0	0	0	14.6	16.8	17.5	20	16.2	0	0	0	0
1988	8.5	11.4	13	16.6	18.3	17.8	17.4	16.4	16.8	16.7	15.9	0
1989	14	14.1	18.1	14.2	19.6	19.5	19	17.5	17.4	17.3	16.1	14.1
1990	14.9	13.3	16.3	14.8	18	18.6	17.5	16.6	16.5	16	14.3	14.9
1991	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1992	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1993	14.7	14	13.1	13	12.8	13	12.5	13.5	13.4	13.7	15	0
1994	11.3	13.59	15.2	17.9	18.2	20.7	20.7	19	17.8	16.9	16.2	0
1995	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1996	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1997	13.3	16.7	19.7	21.7	26	26.1	21.7	21.6	21	20	17.1	14.9
1998	13.2	15.7	19.1	21.1	23.7	24.6	22.5	22.6	21.1	19.7	18.5	15.4
1999	15.1	16.8	18.1	20.1	20.8	22	20.6	21.6	20.4	18.1	14.3	11.5
2000	14	14.8	15.6	17.8	17.9	17	17.7	17.3	16.4	0	12.3	0
2001	11.9	14.5	17	20.6	20.4	16.6	21.2	22.3	19.1	19.6	19.4	18.8
2002	14.6	19.3	20.7	22.1	24	23	21.5	22.6	20.7	22.1	13.1	17.7
2003	17.9	18.6	18.6	21.4	24.3	23.55	20.8	18.9	20.1	14.8	14.7	14.4
2004	14	16.4	18.9	0	0	0	20.4	20.7	20	0	14.5	0
2005	11.9	15.55	16.6	18.1	21.3	22.2	24.5	18.7	16.6	17.1	16.5	14.9
2006	14.6	19.8	20.6	19.9	22.5	18.6	17.4	17.6	18.3	18.5	18.1	17.8
2007	13.7	15.8	18.7	19.2	19	20.1	0	0	0	0	0	0
2008	13.8	14.5	16.4	17.8	15.9	13.7	14.1	17.9	16	12.6	9.9	8.6
2009	9.7	12.8	17.2	13.6	14.2	16.8	16.6	18.4	16.4	14.5	10	8.7
2010	7.3	8.35	13.5	16	21	21.7	19.08	20.8	16.6	11.6	10.9	7.8
2011	8.3	9.76	16.7	22.5	24.7	20.5	0	0	0	0	0	0
Promedio	10.2518182	12.110303	14.3181818	15.2621212	16.8424242	16.5621212	14.7963636	14.1515152	13.5848485	11.7515152	11.1333333	8.13939394

Anexo 2

Tabla 5. Precipitación mensual (mm) en Matehuala, San Luis Potosí durante 1979-2011

Estación climatológica Zaragoza, Matehuala San Luis Potosí. Lluvia total mensual (mm) 1979-2011												
Año	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1979	0	18	4	51	14	5.9	31.9	26.3	72.8	0	3	10.4
1980	1	5.2	0	1.4	3.8	1.1	9.6	12.8	7.6	68.7	35	31
1981	120.5	1	7	85	72.5	68.5	45.5	149.5	43.5	30.9	2	12
1982	0	14	2	55.5	39.9	1	44.5	22.5	61.4	137.5	29	18
1983	56.5	0	15.5	0	117.5	18.5	133.1	97.7	12	22	1	0
1984	41.8	8	2	0	104	33	183.4	77	82.9	11.5	5	11
1985	20	20	4	92	75	183	101.1	0	90	48.3	5	61.9
1986	4	4	4	52	47	70	0	0	0	0	0	0
1987	0	0	0	45	8.2	14.9	113	16.7	0	0	0	0
1988	48	18	50	37	28	165	271	106	83	22.5	0	3
1989	3.7	17.5	0.3	8	6	9	16.2	22.4	29.4	0	37.7	40.6
1990	0	10.5	0	10	19.2	6.5	37.5	40.7	7.4	87.6	0.4	2
1991	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1992	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1993	0	0	0	0	0	0	23.3	0	25.3	0	0	0
1994	13	0	0	41.6	7.3	118.5	46.8	110.6	118.3	0	0	0
1995	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1996	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1997	21	13.5	105	132.5	29	29	64.6	46	0	62	0	0
1998	0	0	0	0	0	0	34	69	75	9	0	0
1999	0	0	0	0	0	38	89	62	53	0	0	0
2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0
2001	0	0	0	10	0	0	0	0	0	129	0	0
2002	0	0	0	0	0	0	0	138	108.7	37.1	43	0
2003	0	0	0	9	12	23	139	0	136.5	0	0	0
2004	0	0	53	0	0	0	80.3	126	48	0	0	0
2005	0	0	0	0	0	0	0	156	27	26	0	12
2006	0	0	0	29	40	126	114.6	0	0	22	3.1	26
2007	26	43	0	60.5	40.5	66	127	111	72.8	20	26	0
2008	0	10	0	99	34	23	86	167	178	111	0	0
2009	4	0	12	0	54	40	34	14.5	124.5	6	2	44
2010	10	51	0	53	30	96	176	24	77	0	0	0
2011	0	0	4	2	0	47	0	0	0	0	0	0
Promedio	11.1969697	7.08181818	7.96363636	26.469697	23.6939394	35.8454545	60.6484848	48.3545455	46.4878788	26.4272727	5.82424242	8.23939394

Chain of Custody Record										Sample analysis (sample may contain hazardous substances)																	
COC# _____ Is there a Sampling and Analysis Plan? Yes No Delivered to: _____ Collection Agency: _____ Order Number: _____ Spatial pattern: _____ Analytical results to: _____ Sampling frequency: _____ (weekly, etc) Correspondence to: _____ Names of Samplers: _____ Laboratory Use Only Lab Batch Code: _____ Sampling program: _____ Sample details verified by: 1) _____ 2) _____ Lab. To filter ** _____ Lab remarks: _____ Remarks: _____										container Treatment Storage	Volume (ml)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
											Type*	Filtered	Type	Porosity	Preserved	Temp.	Time	Lab. To filter **									
											Lab. Remarks																
											Total number of sample containers/filter papers																
Distribution: White and pink copies accompany samples to Lab. LAB confirm condition and number of samples received, fax immediate copy to Department of Environmental within 24 hrs, return white copy to DGE with final report. Field: fax yellow copy to EIB.	Actual Sample QA	Required turnaround time	15	or	()	working days																					
Relinquished (print name)	Signature	by	Date:	Time:	Received by (print name)	Signature	Date:	Time:	All sample containers accounted for? Yes/No	All samples stored as described above? Yes/No																	
Relinquished (print name)	Signature	by	Date:	Time:	Received by (print name)	Signature	Date:	Time:	All sample containers accounted for? Yes/No	All samples stored as described above? Yes/No																	
*P=Plastic, e.g. high density polyethylene; AW=acid washed; DKG= Dark Glass. ** indicates the laboratory is required to filter samples prior to analysis Matrix: 1 = Water, 2 = Soil, 3 = Sediment, 4 = Sludge, 5 = Air, 6 = Rock, 16 = Animal tissue, 17 = Plant tissue, 21 = Regolith, 26 = Periphyton tissue, 27 = Pore water, 28 = Macro invertebrate tissue Matrix Quality: F= Fresh, B= Brackish, S= Saline										C. M.: Collection Method: G= Grab, IN or DR= In situ (direct) reading or observation, OT = Over Time, ID = Integrated over Depth, CI = Composite sample of discrete sites integrated over depth, CS = Composite Sites, CTM: Composite over time, DA = Discrete Auto sampler, CA = Composite Auto sampler, PS = Pump Submersible, PP= Pump Peristaltic, PT = Pump Test, AL= Air Lift, VS = Vacuum Sampler, B= Bailor.																	
Modified from DOW 2009																											
Page 1/7																											

Anexo 3