



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

“CRECIMIENTO Y DESEMPEÑO DE NADO EN EL PEZ COLA DE
ESPADA (Xiphophorus montezumae).”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

PRESENTA:

JANET PATRICIA GUERRERO FLORES



DIRECTOR DE TESIS

Dra. Guillermina Alcaraz Zubeldia

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

FACULTAD DE CIENCIAS

División de Estudios Profesionales



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales
Facultad de Ciencias
P r e s e n t e .

Por este medio hacemos de su conocimiento que hemos revisado el trabajo escrito titulado:

"Crecimiento y desempeño de nado en el pez cola de espada (*Xiphophorus montezumae*)"

realizado por **Guerrero Flores Janet Patricia**, con número de cuenta **095240736** quien opta por titularse en la opción de **Tesis** en la licenciatura en **Biología**. Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Propietario M. en C. Ignacio Andrés Morales Salas

Propietario M. en C. Xavier Gilberto Valencia Díaz

Tutor(a)
Propietario Dra. Guillermina Alcaraz Zubeldia

Suplente Dra. Cecilia Robles Mendoza

Suplente M. en C. Araceli Argüelles Ticó

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Ciudad Univeritaria, D. F., a 14 de mayo del 2007
COORDINADOR DE LA UNIDAD DE ENSEÑANZA DE BIOLOGÍA

DR. ZENÓN CANO SANTANA

Señor sinodal: antes de firmar este documento, solicite al estudiante que le muestre la versión digital de su trabajo y verifique que la misma incluya todas las observaciones y correcciones que usted hizo sobre el mismo.

DEDICATORIAS

A Dios que siempre esta conmigo.

Con mucho cariño, a la memoria de mi madre el pilar principal de mi vida, quien me enseñó del amor de Dios y me infunde fortaleza para salir adelante. Gracias mamá por enseñarme y demostrarme que nada es imposible si somos persistentes y nos empeñamos en lograr nuestras metas. Gracias mamá por todo lo que eres para mí y gracias porque gracias a ti soy quien soy y siempre te llevare en mi corazón.

A mi hijo, quien es mi razón para vivir y amo con todo el corazón. Logan, haré todo lo que este a mi alcance para que estés orgulloso de tu madre y espero lograr ser un digno ejemplo a seguir. Gracias mi amor, por poner tu granito de arena y gracias porque con tu inocencia y risa encantadora me has hecho fácil lograr más de lo que me creía capaz.

A Pico, que hasta ahora ha estado conmigo en las buenas y en las malas y me ha impulsado a seguir adelante en los momentos más difíciles. Gracias Pico por tu amor y por el apoyo incomparable que siempre me has brindado, así como por recordarme a menudo nuestros sueños. Gracias amor por apoyarme con Logan y por deleitarme con tus habilidades culinarias. Espero no defraudar tus expectativas como hasta ahora y gracias por confiar en mi. Te amo.

A mi padre, quien siempre ha estado conmigo a su manera y me ha enseñado a ser una persona sencilla y segura de si misma. Espero lograr enorgullecerte como hija.

A mi hermano, gracias por cuidar de mí como siempre lo hiciste, espero lograr corresponderte. Gracias por todo tu cariño.

A mi hermana, mi mejor amiga, gracias por apostar siempre por mi y por ofrecerme un apoyo total sin escatimar. TQM.

A Lidia, quien con todo su amor y dedicación a mi familia, se ha ganado un lugar muy especial en mi corazón. Gracias por todo el cariño y apoyo sincero y desinteresado. Sobretudo gracias por estar al cuidado de Logan, mientras me dedicaba a mis múltiples deberes.

A la Familia Juárez, sobretudo al pastor Juan Juárez, quien siempre ha estado pendiente de mi familia. Gracias por ser mi segunda familia, por todas sus enseñanzas ya que ustedes han sido una parte importantísima en mi formación.

A mi amiga Angelina Anzures, por ser una mujer digna de admiración, por enseñarme a luchar contra viento y marea siempre con una sonrisa en el rostro. Gracias Angelina por acogerme en tu familia y por tu cariño y ayuda desinteresada, gracias por enseñarme el lado bondadoso de las personas, por recibirme siempre con las puertas abiertas y a manos llenas y por ser tan especial. Espero lograr corresponder tu amistad de la misma manera tan cálida y tierna que tú me has hecho sentir.

A mi amiga Verónica por ser una fuente de inspiración por su tenacidad y nivel de exigencia para la superación personal. Gracias por enseñarme técnicas de relajación y por el tiempo que compartimos juntas durante tu clase que de verdad disfrute.

AGRADECIMIENTOS

A la U.N.A.M., por abrirme las puertas durante tantos años.

A la Facultad de Ciencias, porque durante mi estancia en ella aprendí y crecí como persona y porque en el proceso de mi formación académica conocí a gente maravillosa como Vanessa que descanse en paz.

Al Laboratorio de Ecofisiología, lugar donde conviví con personas increíbles.

A la Dra. Guillermina Alcaraz, por su comprensión y apoyo en todo momento. Gracias Guille por tus enseñanzas y dedicación conmigo, por la paciencia y por confiar en mí. Gracias por tu amistad, por las bromas y risas cuando más las necesitaba.

A Maribel Badillo, por el apoyo técnico durante el desarrollo de mi tesis. Gracias Maribel por toda tu ayuda, por tus consejos y buenos deseos. Gracias amiga.

A Karla Kruesi, por el apoyo técnico durante la elaboración de mi tesis, por compartir conmigo sus conocimientos, por sus comentarios y sugerencias que enriquecieron mi tesis y por su buena disposición . Gracias Karla por ser tan linda amiga, por ser tan buena onda y por tu interés en ayudar a los demás.

A Sebastián Zúñiga, por el apoyo técnico en los programas de cómputo durante mi estancia en el laboratorio. Gracias Sebas por tu ayuda y sobretodo por tus aportaciones para mejorar mi tesis.

A Araceli Argüelles, por su apoyo y su amistad. Gracias Ara por tus consejos y valiosos comentarios y sugerencias en la corrección de mi tesis.

A Xavier Valencia, por su buena disposición y por sus comentarios y aportaciones para la corrección de mi tesis.

A Ignacio Morales, por sus comentarios y sugerencias en la corrección de mi tesis, gracias por ayudar a enriquecer mi tesis.

A Cecilia Robles, por su buena disposición, por su apoyo y por ser participe de mi titulación.

Al Químico Cesar Adrián por el soporte técnico en sistemas, por su participación y colaboración en la realización de mi tesis y por su buena disposición. Gracias Quimi.

A Cuauhtli y a Raúl por confiarme el equipo de cómputo necesario para finalizar mi proyecto y por sus buenos deseos.

A Yenelli por el apoyo y sugerencias en cuanto a los programas de cómputo usados para preparar mi examen.

ÍNDICE

	Pag.
Dedicatorias.....	i
Agradecimientos.....	iii
Índice.....	v
Índice de figuras.....	vi
Resumen.....	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Características del orden Cyprinodontiformes.....	1
1.2. Características de la familia Poeciliidae.....	1
1.3. Características de la subfamilia Poeciliinae.....	2
1.4. Características del género <i>Xiphophorus</i>	3
1.5. Ubicación taxonómica del pez cola de espada.....	7
1.6. Características de <i>Xiphophorus montezumae</i>	7
1.7. Selección sexual en el género <i>Xiphophorus</i>	9
1.8. Nado.....	11
1.8.1. Pruebas de capacidad de nado	13
1.9. Crecimiento.....	16
1.9.1. Crecimiento en la madurez sexual.....	19
3. HIPÓTESIS	21
4. OBJETIVOS	21
5. MÉTODOS	22
5.1. Colecta.....	22
5.2. Selección de muestra y aclimatación.....	23
5.3. Registro merístico de los organismos.....	24
5.4. Velocidad crítica de nado.....	25
5.5. Corte de la espada.....	28
5.6. Tasa de crecimiento	28
5.7. Factor de Condición y Razón de Fineza Hidrodinámica.....	29

6. RESULTADOS	30
7. DISCUSIÓN.....	37
8. CONCLUSIONES.....	41
9. LITERATURA CITADA	42

INDICE DE FIGURAS

Pag.

1. Distribución geográfica de las especies del género <i>Xiphophorus</i>	4
2. Hipótesis filogenética para especies del género <i>Xiphophorus</i>	6
3. Macho de <i>X. montezumae</i>	8
4. Sistema del túnel de nado tipo Brett.....	26
5. Talla de machos y hembras de <i>X. montezumae</i> a lo largo de un período de 75 días.....	31
6. Factor de Condición de machos y hembras de <i>X. montezumae</i> a lo largo de un período de 75 días.....	32
7. Razón de Fineza Hidrodinámica de machos y hembras de <i>X. montezumae</i> a lo largo de un período de 75 días.....	33
8. Velocidad crítica de machos con espada, machos sin espada y hembras de <i>X. montezumae</i> de la misma edad.....	34
9. Relación de la velocidad crítica en función de: a) el peso y b) la longitud estándar, tanto en machos sin espada como en hembras de <i>X. montezumae</i>	35
10. Relación entre la velocidad crítica con la tasa de crecimiento en unidades de: a) peso y b) longitud estándar, tanto en machos, como en hembras de <i>X. Montezumae</i>	36

1. RESUMEN

En el presente trabajo, se estudió el crecimiento de machos y hembras de *X. montezumae* a través de distintos parámetros morfométricos durante un período de 75 días. Se observó que al final de este período, las hembras mostraron un mayor crecimiento en cuanto a peso, longitud estándar y altura corporal respecto a los machos. Fenómeno que en las hembras puede estar asociado a adquirir una forma más hidrodinámica ya que mostraron un incremento en la Razón de Fineza Hidrodinámica hacia el final del período de 75 días, igualando los valores mostrados por los machos, mismos que conservaron su forma hidrodinámica durante este período. Se observó que el Factor de Condición en las hembras fue mayor respecto al de los machos durante este período.

Se estudio también el desempeño de nado en hembras, en machos con espada y en machos sin espada a través de la velocidad crítica. Se observó un incremento en la velocidad crítica de los machos después del corte de la espada; sin embargo, la velocidad crítica en hembras fue similar a la mostrada por los machos antes y después del corte de la espada. Adicionalmente, se relacionó el desempeño de nado de machos y hembras con la tasa de crecimiento; sin embargo, no se encontró correlación entre el desempeño de nado y la tasa de crecimiento en ambos sexos.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Características del orden Cyprinodontiformes (Microcyprini)

Los miembros de este orden habitan en latitudes templadas y tropicales, donde ocupan hábitats de agua dulce y salinos (Rosen & Bailey, 1963). Se reconocen 8 familias con 88 géneros con alrededor de 807 especies. Se propone que el orden Cyprinodontiformes tiene un origen monofilético de acuerdo a caracteres (sinapomórficos) derivados, tales como la aleta caudal simétrica soportada internamente por un epural, la primera costilla pleural en la segunda vértebra en vez de la tercera y un brazo alveolar de la premaxila (Nelson, 1994).

Los caracteres que poseen los peces de este grupo incluyen orificios nasales pareados, radios branquiostegos (3 a 7) y aletas pélvicas. La mandíbula superior esta bordeada por una premaxila protusible, usualmente presentan vomer y siempre presentan supracleithrum. Pueden o no presentar parietales, poseen de 24 a 54 vértebras. El diámetro del huevo varía de 0.3 a 3 mm, la duración del desarrollo embrionario puede ser de menos de una semana hasta un año. El dimorfismo sexual que presentan es muy marcado. Los machos son generalmente de colores más brillantes y de menor talla que las hembras (Nelson, 1994).

1.2. Características de la familia Poeciliidae

La familia Poeciliidae se distribuye desde el Oriente de Estados Unidos hasta Sudamérica (Fig. 1), así como en África (incluyendo Madagascar). Incluye peces de agua dulce o salobre y de bajas elevaciones (menores a 300 m. s. n. m.). Se conocen 30 géneros con alrededor de 204 especies (Nelson, 2006); incluye tres subfamilias, Poeciliinae, Fluviphylacinae y Aplocheilichthyinae. Los peces de la familia Poeciliidae son pequeños y no llegan a medir más de 20 cm de longitud. Un rasgo sobresaliente de la familia es que la mayoría de las estructuras útiles taxonómicamente se centran en los machos (Rosen & Bailey, 1963).

La familia Poeciliidae presenta dimorfismo sexual. Además de la talla, los sexos difieren en otras estructuras tales como, la aleta anal (gonopodio en machos) y la suspensión de la misma (suspensorio gonopodial), las aletas pélvicas, las aletas pectorales y en menor grado las aletas caudales y dorsales, partes de la boca y dorsicranium, las costillas pleurales, así como también el patrón de coloración (Rosen & Bailey, 1963). La aleta anal y su suspensión son las principales bases para su división en tribus, géneros y especies debido a su gran importancia taxonómica (Rosen & Bailey, 1963). El gonopodio puede estar presente o ausente (Nelson, 1994), este es empleado por los machos como un órgano copulatorio y se forma al inicio de la madurez sexual por modificación de la aleta anal inmadura. Durante el desarrollo del gonopodio (Rosen & Bailey, 1963) pueden distinguirse tres fases: 1) fase preeliminar, 2) fase de crecimiento y 3) fase de diferenciación.

1.3. Características de la subfamilia Poeciliinae

La subfamilia Poeciliinae es un grupo de peces de agua dulce. Son organismos vivíparos y una de sus características diagnósticas es la presencia de un gonopodio copulatorio (Rodríguez, 1997). La talla máxima que alcanzan estos peces es de cerca de 18 cm; sin embargo, la mayoría de las especies son mucho más pequeñas (Nelson, 1994). La subfamilia se conforma por la tribu Tomeurini, tribu Xenoderiini y tribu Poeciliini, a la cual pertenecen los peces del género *Xiphophorus*, de ellos, la tribu Poeciliini posee alrededor de 225 especies dentro de los siguientes géneros: *Alfaro*, *Belonesox*, *Brachyrhaphis*, *Carlhubbsia*, *Cnesterodon*, *Gambusia*, *Girardinus*, *Heterandria*, *Neoheterandria*, *Phallichthys*, *Phalloceros*, *Phalloptychus*, *Phallotorynus*, *Poecilia*, *Poeciliopsis*, *Priapella*, *Priapichthys*, *Quintana*, *Scolichthys* y *Xiphophorus*. Los peces de esta subfamilia se distribuyen desde el Oriente de Estados Unidos hasta el noroeste de Argentina y Uruguay, incluyendo el Caribe (Nelson, 2006).

Los machos de esta subfamilia presentan rayos elongados en la aleta anal anterior y un gonopodio formado por modificación del 3^{er}, 4^o y 5^o rayos de la aleta anal. Otra modificación en los machos es la curvatura hacia adelante de las costillas pleurales (Rodríguez, 1997). La fertilización es interna, los huevos presentan yemas grandes, no presentan cóndilos exoccipitales y los arcos neurales de la 1^a vértebra son abiertos, no parecen formar una espina neural (Nelson, 1994).

Algunos de estos peces son de ornato como los “guppy” y “mollies” del género *Poecilia* y los “cola de espada” y “platies” del género *Xiphophorus*. Su importancia se atribuye en gran parte a la afición por los peces ornamentales que actualmente representa una industria multimillonaria (Gómez *et al.*, 1999).

1.4. Características del género *Xiphophorus*

Los peces del género *Xiphophorus* se distribuyen desde la Sierra Madre Oriental en México, Guatemala, Belice y Honduras (Fig. 1). Son organismos vivíparos, de cuerpos de aguas dulces y zonas tropicales (Rosen, 1973). Las especies de este género habitan en ríos poco profundos o arroyos que vierten sus aguas al océano Atlántico, Golfo de México y el Caribe (Rosen & Bailey, 1963). El género *Xiphophorus* se considera como un grupo monofilético. Los organismos que pertenecen a este género, son conocidos comúnmente como platies o peces cola de espada (Rauchenberger *et al.*, 1990). Los peces cola de espada se pueden dividir en dos grupos, de acuerdo a su distribución geográfica (Fig. 2):

- Peces cola de espada del norte, distribuidos al noroeste de México, en las cuencas del Río Pánuco desde el sudoeste de Tamaulipas hasta el Río Samantha en Hidalgo.
- Peces cola de espada del sur, distribuidos al sureste de México, desde la cuenca del Río Nautla en Veracruz hasta Guatemala, Belice y el norte de Honduras.

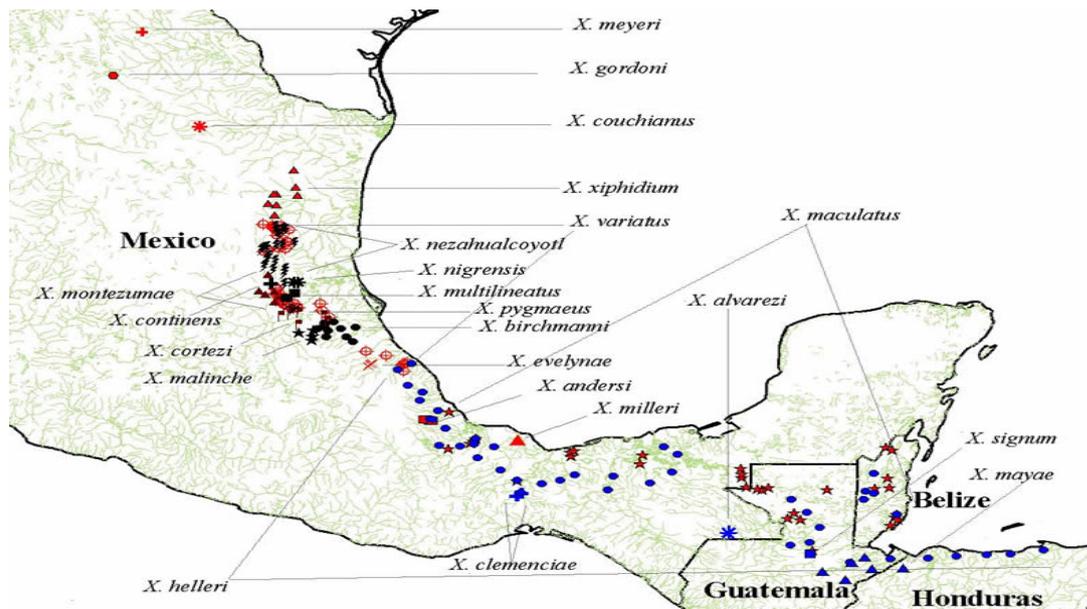


Figura 1. Distribución geográfica de las especies del género *Xiphophorus*.

* Las localidades marcadas en este mapas son aproximadas y se basan en manuscritos de Rauchenberger *et al.* (1990), Rosen (1960), Borowsky (1984), así como en descripciones originales de las especies (Kazianis & Kumar, 2003).

Los peces del género *Xiphophorus* presentan marcado dimorfismo sexual, ya que las hembras generalmente alcanzan tallas mayores que los machos de las mismas especies. Las excepciones las constituyen *X. birchmanni* y *X. multilineatus* en los que no se han observado diferencias de talla entre machos y hembras adultos (Marcus *et. al.*, 1999). En este género también se observa dimorfismo sexual en la estructura de la aleta caudal ya que en muchas especies los machos presentan una aleta caudal alongada, la cual es denominada espada y se encuentra ausente en las hembras.

En *Xiphophorus*, tanto en los peces cola de espada del norte como en los cola de espada del sur, la expresión de la espada es exclusiva de machos. Se ha observado a hembras de algunas poblaciones de *X. helleri* que pueden llegar a expresar una banda de color a lo largo del margen inferior caudal y en algunas otras especies, los rayos en la base de la aleta caudal pueden inclusive llegar a elongarse en hembras mayores o androgenizadas (Basolo, 1995).

Se puede definir como espada a la estructura elongada coloreada que se extiende desde el margen inferior de la aleta caudal y cuyos componentes básicos son los siguientes (Basolo, 1995):

- **Elongación**, aumento de longitud de los rayos caudales 6, 7 u 8-11 o 12.
- **Coloración melanófora de rayos caudales 7, 8 o 9-11 o 12** en el límite superior de la espada junto a la banda de color superior.
- **Coloración melanófora de rayos caudales 1-6, 7 u 8** en el límite inferior de la espada, junto a la banda de color inferior.
- **Coloración carotenoidea y/o pterin**, área inmediata sobre la banda de color inferior. Esta coloración puede ser verde, amarilla, o anaranjada.

En los peces cola de espada se observan espadas constituidas por estos cuatro componentes. En *Xiphophorus* la espada o protrusión caudal es pigmentada y al parecer la coloración y longitud de la espada han evolucionado de manera paralela (Marcus *et al.*, 1999). Sin embargo, evidencia morfológica y ontogénica sugiere que la espada completa tuvo al menos dos orígenes dentro de los peces cola de espada (Rauchenberger *et al.*, 1990).

Cabe resaltar que el debate acerca de la evolución de la espada en *Xiphophorus* se centra en las fuerzas selectivas que contribuyeron al origen de la estructura. La hipótesis filogenética para especies del género *Xiphophorus* presentada por Marcus *et al.* (1999) muestra a *X. nezahualcoyotl* como especie hermana de *X. montezumae* y *X. continens* emparentado con ambos (Fig. 2). De esta forma, los platies con ausencia de espada se colocan como antecesoros respecto a todas las especies que poseen espada, sugiriendo que el estado de ausencia de espada es el estado ancestral en el género *Xiphophorus*. Sin embargo, existen contradicciones en la filogenia de estos organismos y la reconstrucción de estados ancestrales de la espada, debido a que esta estructura ha aparecido y se ha perdido en la historia evolutiva (Marcus *et al.*, 1999).

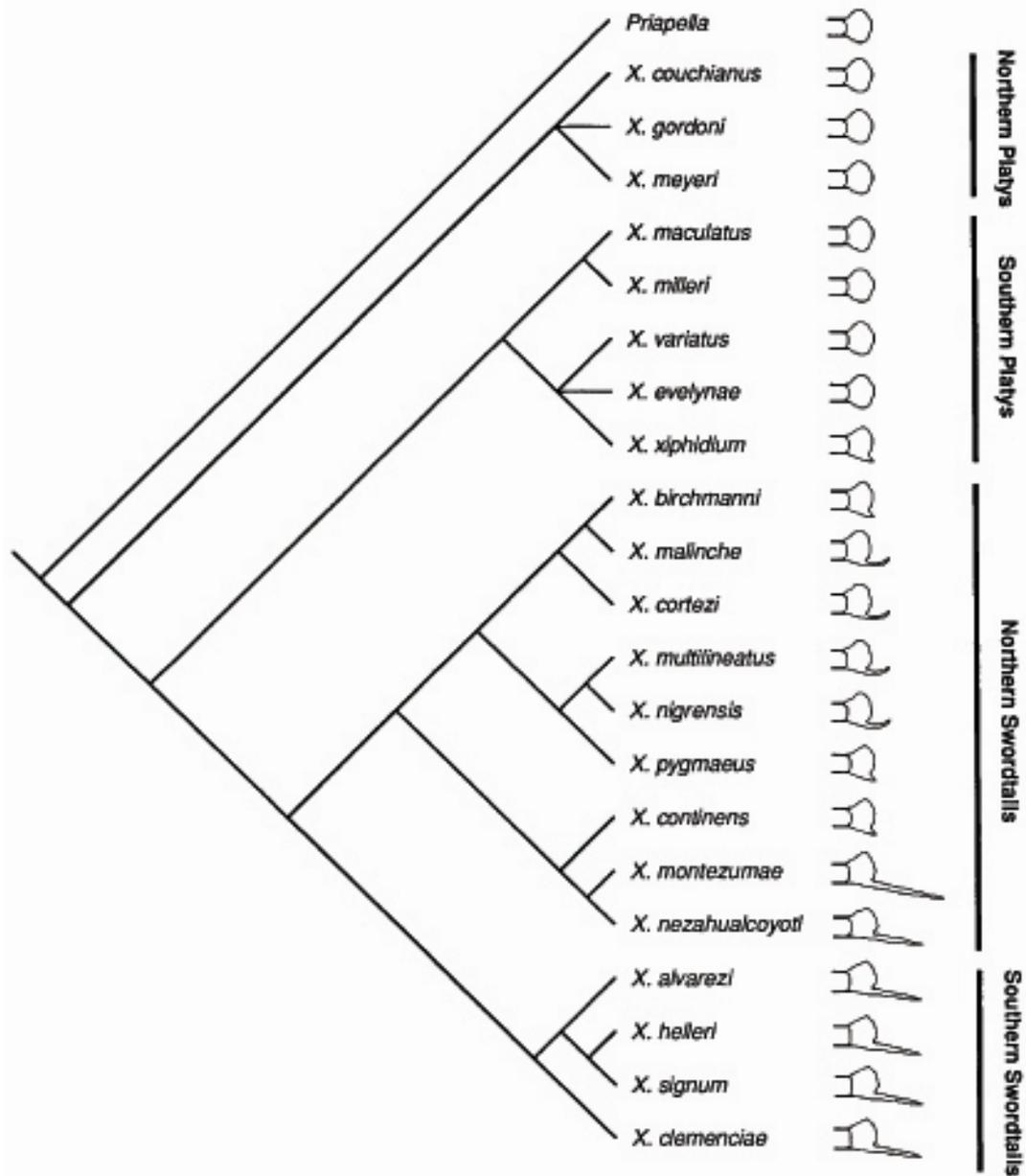


Figura 2. Hipótesis filogenética para especies del género *Xiphophorus* presentada por Marcus *et al.* (1999). Incluye información de acuerdo a la hipótesis presentada por Basolo (1991), Rosen (1979) y Rauchenberger *et al.* (1990). *X. andersi* no se incluye en esta filogenia.

No se conocen con certeza los factores selectivos que han contribuido a la pérdida de la espada (Marcus *et al.*, 1999); sin embargo, la ausencia de la espada se considera como el estado primitivo del carácter (Ryan *et al.*, 1990).

Por otro lado, la aparición de la espada puede representarles desventajas, por ejemplo, el incremento en la longitud de la espada puede causar mayor depredación debido a una menor movilidad, mayor gasto energético para el crecimiento de la espada y si hay un crecimiento excesivo en la espada se incrementan los costos energéticos en el nado y en el cortejo (Basolo, 1990; Basolo & Alcaraz, 2003; Kruesi & Alcaraz 2007).

1.5. Ubicación taxonómica del pez cola de espada

Orden: Cyprinodontiformes

Familia: Poeciliidae

Subfamilia: Poeciliinae

Tribu: Poeciliini

Género: *Xiphophorus*

Especie: *Xiphophorus montezumae*

1.6. Características de *Xiphophorus montezumae*

Xiphophorus montezumae se distribuye en América Central (Fig. 1); al noroeste de México en las cuencas del río Tamesí en Tamaulipas, al norte de Veracruz y en los afluentes del río Panuco en San Luis Potosí, México (Rauchenberger *et al.*, 1990; Espinoza *et al.*, 1993). La primera descripción de *X. montezumae* fue publicada por Jordan & Snyder (1899). Su nombre común es pez cola de espada de Montezuma (Fig. 3). Es un organismo omnívoro, no migratorio, de clima tropical (20 a 26 °C y pH de 7.0 a 8.0) y hábitat bentopelágico. Los peces cola de espada se caracterizan por poseer múltiples bandas de color en forma de zigzag laterales, reticulum bien desarrollado y un índice de espada promedio de 1.0 (Rauchenberger *et al.*, 1990). Los machos presentan una espada larga centralmente limitada con melanóforos y un gancho bien formado en el 5º rayo del gonopodio. La espada generalmente se compone por rayos sin líneas de división (Rauchenberger *et al.*, 1990).

Los machos presentan un patrón de pigmentación bien desarrollado, sin extenderse más allá del margen distal de la parte superior de la aleta caudal (Rauchenberger *et al.*, 1990).



Figura 3. Macho de *Xiphophorus montezumae*.

El inicio y término del proceso de madurez sexual se pueden determinar en los machos por medio de la diferenciación del gonopodio en la aleta anal. El inicio de la madurez sexual coincide con la elongación del tercero, cuarto y quinto rayo anal y posteriormente se inicia la diferenciación y actividad gonadotrópica. Adicionalmente, los rayos de la aleta caudal comienzan a elongarse para formar la espada. Los rayos en la base de la aleta caudal adquieren un borde de coloración negra. La elongación de los rayos caudales inicia cuando los machos llegan a la etapa gonopodial 3 o 4 y el crecimiento continúa hasta 30 semanas después de alcanzar la etapa 6 (Kallman, 1983).

En hembras es difícil evaluar la madurez sexual; sin embargo, puede determinarse por medio de disección. Generalmente, el abdomen de las hembras es delgado hasta alcanzar la madurez, momento en el que asume una apariencia redondeada y la mancha de preñez llega a ser prominente (Kallman, 1983).

Otras características de *X. montezumae* incluyen patrones de pigmentos carotenoides amarillos no polimórficos, espada hacia arriba en los juveniles. Sin embargo, es más recta en machos más largos (Rauchenberger *et al.*, 1990). Presentan de 27 a 29 escamas en una serie longitudinal, la altura máxima del cuerpo es de 3 a 3.5 veces la longitud estándar y la longitud cefálica de 4 a 4.3 veces la longitud estándar.

1.7. Selección sexual en el género *Xiphophorus*

Las hembras de estos peces seleccionan diferencialmente una pareja en función de la variación entre las señales provenientes de los machos ya sean acústicas, químicas o visuales (Basolo, 1990). La espada es un ejemplo de las señales visuales. Las hembras del género *Xiphophorus*, tanto platies como cola de espada, comparten preferencias de apareamiento que favorecen la espada, a pesar de que este carácter esté ausente en la historia evolutiva de los platies. De esta forma, la preferencia por la espada surge antes que el carácter (Basolo, 1995b).

Los modelos hipotéticos que se han propuesto para explicar la evolución en las preferencias de las hembras son los siguientes: beneficios directos, buenos genes, procesos "fisherianos", efectos correlacionados y sesgos preexistentes. Sin embargo, de las hipótesis anteriores, la hipótesis de sesgos preexistentes ha sido la más aceptada. El modelo de sesgos preexistentes a diferencia de otros modelos que predicen coevolución de la preferencia y el atributo, sugiere que tendencias preexistentes en el sistema de las hembras, resultantes de procesos evolutivos, están presentes antes de la aparición del carácter en el macho; esto es, puede generarse selección sobre un carácter en específico debido a cierta preferencia general. Por ejemplo, la preferencia por la coloración o intensidad, la preferencia por las bandas de color, o por la estimulación visual en el plano horizontal, podrían explicar la evolución de la espada (Basolo, 1990b).

De esta manera, tendencias preexistentes podrían evolucionar sin ser evidentes hasta que el carácter surge y entonces éste es reconocido y seleccionado (Basolo, 1990b). Así, cuando el carácter en el macho es seleccionado por sesgos preexistentes, otras fuerzas selectivas pueden actuar o modificar la expresión del atributo o la preferencia por el mismo. Basolo (1990b), sugiere que la hipótesis de sesgos preexistentes es la que mejor explica la preferencia de las hembras y la evolución del carácter en los machos de *Xiphophorus*, la cual es apoyada también por Meyer *et al.* (1994) basado en su estudio filogenético con *Xiphophorus* (Wiens *et al.*, 1996).

La presencia de la espada en algunos machos del género *Xiphophorus* determina un costo en términos de selección natural. Esto es, a pesar de que le confiere ventajas en cuanto a selección sexual incrementando el éxito reproductivo de los machos conlleva un costo debido a que los machos con espada experimentan una disminución en la velocidad de nado (Kruesi & Alcaraz, 2007).

Así mismo, existen costos para las hembras que pueden estar asociados con la preferencia de algún atributo del macho. Existen numerosas maneras en las que la expresión por una preferencia puede acarrear un costo. Por ejemplo, si el grado de la expresión de la preferencia se correlaciona positivamente con el costo (tiempo y energía) relacionada a encontrar la pareja preferida, entonces encontrar un macho con cierto atributo preferido, incrementaría el costo para las hembras. De esta manera, la búsqueda de una pareja puede incrementar el riesgo de depredación; si las hembras con la preferencia se toman más tiempo en encontrar pareja, éstas se exponen a un mayor riesgo de depredación respecto a hembras que no tienen preferencia (Basolo, 1996). Adicionalmente, preferir y aparearse con un macho vistoso (con espada evidente) puede atraer a los depredadores, aumentando el riesgo de ser depredadas.

1.8. Nado

El nado ha sido considerado como un carácter determinante en la sobrevivencia de los peces, ya que el desempeño y las habilidades de nado pueden determinar la capacidad para obtener alimento, encontrar pareja así como para evitar condiciones desfavorables o depredadores en el hábitat natural (Plaut, 2001). Los peces están bien adaptados para la locomoción en un medio denso y viscoso. El diseño de los peces les permite cambiar la forma del cuerpo para generar una fuerza de empuje mientras avanzan en el agua, usando sus aletas pareadas e impares. De esta manera, el desempeño locomotor es considerado como un parámetro potencial de la condición y su estudio se ha centrado principalmente en el mecanismo de propulsión usado por el organismo, es usado como un estimado de salud, nivel de estrés o habilidad para enfrentarse a cambios ambientales (Nelson, 2002). La mayoría de los peces se impulsan por una combinación de dos sistemas motores independientes usados bajo distintas condiciones de nado. Estos son, la generación de ondas transversas a lo largo del cuerpo o por movimientos laterales de la aleta caudal. Estos procesos resultan de la operación de la musculatura axial segmentada, dividida en miotomas (Bone *et al.*, 1982).

Por otra parte, la velocidad del agua en diferentes microhábitats puede influenciar el desempeño de nado de los organismos, así como la talla y forma para la sobrevivencia de los mismos. En el caso de *X. montezumae*, el tipo de nado es de vital importancia debido a que estos organismos habitan en sistemas fluviales donde es necesario mantener una posición contraria a la corriente de agua. Por lo que la capacidad de nado es importante tanto para la sobrevivencia y el desarrollo de estos organismos. Watkins (1996) desarrolló un estudio que demuestra la correlación entre la capacidad de nado y el riesgo de depredación. El autor midió la velocidad de nado explosivo en renacuajos de *Pseudacris regilla* y encontró que los renacuajos más lentos eran más vulnerables a la depredación por serpientes de agua que aquellos que eran más rápidos (Plaut, 2001).

Los resultados mostraron la significancia de la capacidad de locomoción en las fuerzas selectivas naturales de sobrevivencia (Plaut, 2001). Por lo tanto, la capacidad locomotora especialmente en peces es muy importante ya que de ella depende principalmente el éxito en las interacciones depredador-presa, así como la determinación de dominancia jerárquica en muchos casos.

En muchas especies de peces el desempeño de nado se correlaciona positivamente con un metabolismo activo, buena salud y la resistencia. La calidad de la dieta también puede afectar el desempeño de nado; por ejemplo Björnsson (1993) encontró que la velocidad de nado está positivamente correlacionada con la disponibilidad de alimento para el bacalao del atlántico. Esto es, el desempeño de los organismos se relaciona con el estatus nutricional y energético (Royle *et al.*, 2006). El ambiente también influye con la capacidad de nado de los organismos. Nicoletto *et al.* (1999) comparó el desempeño de nado en guppies *Poecilia reticulata* de localidades de río arriba y río abajo, encontrando que aquellos que se encuentran en localidades río arriba nadaron significativamente más rápido y presentaron mayores rangos de despliegues que aquellos que habitan río abajo.

El nado puede ser clasificado en tres categorías de acuerdo al nivel de actividad (Beamish, 1978). Estas categorías se describen de la siguiente manera:

- Velocidad de nado **sostenido**. Implica velocidades mantenidas por un organismo durante tiempos prolongados (>240 min; Beamish 1966; Brett, 1967), sin alcanzar la fatiga muscular.
- Velocidad de nado **prolongado**. Comparada con la velocidad de nado sostenido, está implicada en lapsos más cortos (20 s - 200 min; Beamish, 1978) y finaliza con la fatiga del organismo.
- Velocidad de nado **explosivo**. Es la más alta alcanzada por el organismo. Sin embargo, sólo es mantenida por lapsos de tiempo cortos (<20 s; Beamish, 1978). El metabolismo que sostiene este tipo de actividad es anaeróbico, a diferencia de las anteriores.

1.8.1. Pruebas de capacidad de nado

Existen diversos métodos para medir la capacidad aeróbica de nado en peces; sin embargo, el más utilizado es el de velocidad crítica de nado (Brett, 1964). La velocidad crítica de nado (U_{crit}) es una medida estándar usada para evaluar la capacidad de nado de los peces y fue diseñada inicialmente para evaluar la relativa habilidad de los salmones para ascender por aguas lóxicas hacia sus arroyos natales. La velocidad crítica de nado puede definirse como la máxima velocidad de nado sostenida aeróbicamente por los peces (Lowe, 1996). Esta es usada generalmente para evaluar los efectos de diferentes factores sobre la habilidad de los peces para nadar, así como para determinar los efectos ecológicos del hábitat sobre los peces. Tales como, la temperatura, la salinidad, la forma del cuerpo o efectos tóxicos de contaminantes (Plaut, 2001).

Con el fin de estimar la velocidad crítica de nado, el organismo es colocado en un túnel de nado tipo Brett y es forzado a nadar en contra de la corriente de agua a diferentes velocidades. La velocidad de la corriente se incrementa gradualmente a lo largo de intervalos de tiempo previamente determinados. Después de varios intervalos o incrementos de velocidad el organismo se fatiga y es arrastrado hacia la malla o red colocada al final del túnel de agua. En esta etapa, la medición termina y la velocidad crítica de nado puede entonces ser estimada (Plaut, 2001). Durante las pruebas de velocidad crítica de nado es importante reconocer el período de la fatiga.

La fatiga, es un período fácilmente reconocible durante las pruebas de nado en el que se presenta una baja eficiencia en los procesos metabólicos y una disminución en la capacidad para desempeñar actividades energéticamente costosas. De manera que, la fatiga se define como el punto en el cual el organismo ya no puede mantener su posición en el túnel de nado en contra de la corriente y es arrastrado hacia el final del túnel de nado chocando con la malla.

Anteriormente se utilizó una malla electrificada para mantener al organismo nadando (Kiceniuk & Jones, 1977). Sin embargo, estas prácticas actualmente violan las regulaciones de cuidados en animales además de estresar innecesariamente al organismo (Kolok, 1999).

La velocidad crítica de nado puede expresarse como velocidad de nado absoluta en unidades de cm s^{-1} o bien como velocidad de nado relativa en unidades de BL s^{-1} (cuerpos por segundo). La velocidad crítica de nado es también la forma más conveniente para medir desempeño de nado sin dañar al organismo. Adicionalmente esta respuesta puede ser considerada como la mejor medida ecofisiológica para estimar la capacidad de desempeño de nado y predecir consecuencias ecológicas, especialmente en peces de río que migran corriente arriba o peces que sostienen su posición en contra de la corriente de agua, así como peces pelágicos planctívoros (Plaut, 2001).

Durante la construcción del sistema de túnel de nado tipo Brett (Brett, 1964; Fig. 4) y el desarrollo de los experimentos deben tomarse en cuenta las siguientes consideraciones en cuanto a las condiciones de nado-flujo:

- **Características de flujo.** Debe producirse en el túnel de agua del sistema un flujo laminar (Bell & Terhune, 1970). Sin embargo, es difícil lograr un flujo de agua totalmente laminar, en la mayoría de los casos se obtiene un flujo de agua uniformemente microturbulento (Gordon *et al.*, 1989; Plaut & Gordon, 1994).
- **Efecto pared.** Dentro del túnel de agua se crea una capa cerca de las paredes, techo y piso, cuya profundidad está relacionada de forma negativa a la velocidad de agua en el túnel. De manera que, cerca de esta capa, el organismo podría encontrar lugares con velocidades más bajas. Así mismo, el organismo puede experimentar presión de resonancia por su propio movimiento y despegarse de las paredes.

Se ha visto que un organismo realiza menos esfuerzo para mantener su posición en la corriente al nadar junto a una pared sólida (Webb, 1993b).

- **Efecto de bloqueo.** El organismo puede llegar a bloquear parte de la sección transversal del área del túnel, creando mayores velocidades y un régimen de presión diferente cerca de su propio cuerpo. Este efecto se debe corregir cuando el área de la sección transversal máxima del organismo sea mayor al 10% de la sección transversal del túnel de agua (Bell & Terrhune, 1970).

Los datos de velocidad crítica de nado, tal como otros tipos de desempeño locomotor, son altamente variables y se llegó a considerar que la variación que se observa en la respuesta no reflejaba la variabilidad biológica, expresando en su lugar problemas metodológicos. Sin embargo, se ha demostrado que la variación inter-individual es un fenómeno repetible y refleja variabilidad real en la capacidad de nado de peces. Esto se ha observado en estudios con *Micropterus salmonides* (Kolok, 1992), *Ptychocheilus oregonensis* (Kolok & Farrel, 1994), *Gadus morhua* (Nelson *et al.*, 1994; Reidy *et al.*, 2000), entre otros y de acuerdo a Plaut (2001), la repetibilidad de las variaciones inter-individuales y la variación genética implicada, sugieren que la velocidad crítica de nado individual puede representar un rasgo que afecta significativamente la adecuación Darwiniana. Otros factores importantes asociados a la adecuación Darwiniana y positivamente correlacionados con la velocidad crítica de nado son la coloración y territorialidad del macho (Kolok, 1999).

En otro tipo de experimentos, en los cuales los animales se someten a exposiciones crónicas de contaminantes, las pruebas de velocidad crítica de nado pueden medir efectos sub-letales de exposición crónica, generando información precisa y relevante acerca del ecosistema en el hábitat contaminado. En algunos estudios, se ha visto un decremento en los valores de velocidad crítica de nado conforme se incrementan las concentraciones del contaminante (Hammer, 1995).

De manera similar, se ha visto que la exposición a diferentes fotoperíodos altera los valores de velocidad crítica de nado en juveniles de *Micropterus salmoides*. Sin embargo, tal efecto no es constante a través de diferentes temperaturas, ya que el efecto depende de en qué temporada se lleven a cabo los experimentos (Kolok, 1991).

1.9. Crecimiento

El término crecimiento denota un cambio en magnitud, ya sea en longitud u otra dimensión física como por ejemplo, el volumen, peso o masa. Puede ser determinado en distintos niveles tales como, el contenido proteínico u otros elementos químicos del cuerpo, así como el contenido calórico, etc. El crecimiento puede incluso denotar un cambio en el número de animales dentro de una población dada. Sin embargo, el proceso básico de crecimiento en peces es distinto al visto en vertebrados mayores.

El crecimiento en los peces es de naturaleza plástica y esencialmente indeterminado, como en muchas plantas. De manera que, en peces la energía ingerida que no es desechada en productos fecales ni excretos y no es usada en el metabolismo, se encuentra disponible para el crecimiento ya sea somático o reproductivo. Por tanto, el crecimiento en peces, generalmente se describe como un incremento en peso (Jobling, 1994). La composición del cuerpo de los peces no es constante. Esto es, las relativas proporciones de proteínas, lípidos, carbohidratos y agua varían de acuerdo a las condiciones alimenticias, así como al nivel de suministro del alimento (Jobling, 1994).

La tasa de crecimiento en peces responde además de otras variables al suministro de alimento, a la densidad de la población y temperatura del medio. Adicionalmente, se pueden observar grandes diferencias individuales en la tasa de crecimiento de los miembros de una población fenómeno que generalmente se da como respuesta a una variación en los recursos.

Sin embargo, aun cuando los organismos son provistos de alimentos bajo condiciones controladas se ha visto que dichas variaciones en el crecimiento persisten, tal como se ha observado por Gallego & Heath (1997) y Wang (1998). Por otra parte, bajo condiciones de déficit de alimento, los individuos pueden llegar a compensar el inicio pobre en la alimentación hasta alcanzar y continuar normalmente, o incluso exceder la tasa inicial de crecimiento, tomando en cuenta que el desempeño físico será altamente variable (Royle, 2006). Así mismo, dicha compensación en el crecimiento tiene costos a largo plazo; por ejemplo, la reducción en el desempeño locomotor, debido posiblemente a una alteración del desarrollo del músculo (Metcalfe & Monaghan, 2001).

Se ha observado que existe una relación positiva entre la tasa de crecimiento y la adecuación (Mangel, 2001). Los juveniles con crecimiento rápido alcanzan la talla o edad de madurez más rápidamente que aquellos de crecimiento lento; estos organismos que crecen más rápido típicamente poseen una mayor fecundidad o éxito de apareamiento respecto a la de aquellos adultos de crecimiento lento. Desde este punto de vista de diferencias individuales en la tasa de crecimiento este fenómeno es interpretado en términos de variación en la calidad individual, lo que puede ser resultado de diferencias en la habilidad competitiva por la adquisición de los recursos (Mangel, 2001). Sin embargo, se ha visto que aquellos individuos de crecimiento rápido poseen menor tasa de sobrevivencia que aquellos de crecimiento lento viviendo simpátricamente (Mangel, 2001).

En diversas especies de Poecilidos durante la madurez sexual, se da el fenómeno de inhibición por factores sociales. La inhibición social tiene efectos importantes en la regulación de la maduración y en la distribución de las tallas, así como en la proporción de machos adultos en poblaciones naturales (Mayden, 1987). A pesar de que el fenómeno de inhibición se correlaciona con la talla relativa y estatus de dominancia, el mecanismo específico se desconoce.

Sin embargo, se han hecho las siguientes observaciones al respecto (Mayden, 1987):

- Existe polaridad de talla. En experimentos por pares, generalmente el macho más grande retrasa la maduración del más pequeño (Borowski, 1973a, 1973b).
- Existe polaridad social. El macho dominante retrasa la maduración del subordinado. En poecilidos se ha registrado una correlación entre la talla y la dominancia (Sohn, 1977b).
- En poblaciones naturales, la inhibición del crecimiento de juveniles se rige por la frecuencia relativa tanto de juveniles, como de machos adultos, así como por la talla relativa de los organismos. Esto es, a mayor proporción de adultos presentes en la población cuya talla sea mayor respecto a la de los juveniles, la inhibición de maduración en estos últimos será mayor (Borowsky, 1978).

En estudios realizados en *X. maculatus* y *X. variatus*, Mayden (1987) encontró que el efecto de la inhibición social al inicio y al término de la madurez sexual se correlaciona con la conducta agonista. Otros autores han sugerido que la inhibición social en la maduración puede ser un fenómeno mediado por el estrés (Ericsson, 1967; Scott & Currie, 1980). De manera simultánea a la conducta agonista es muy posible que intervengan otros factores de estrés social, tal como las feromonas, las cuales contribuirían al fenómeno de inhibición del desarrollo sexual en machos de *Xiphophorus* (Mayden, 1987).

En cuanto a la relación entre la tasa de crecimiento y el desempeño de los organismos, Royle *et al.* (2006) señala que la tasa de crecimiento inicial afecta la futura habilidad para mejorar el desempeño de nado en *X. helleri*. Los machos de *X. helleri* cesan su crecimiento corporal al alcanzar la madurez sexual y la talla del adulto es un indicador de dominancia en las interacciones con otros machos. Sin embargo, se desconocen las causas estructurales o metabólicas que actúan para compensar los efectos inducidos en el crecimiento o desempeño

muscular (Royle *et al.*, 2006).

1.9.1. Crecimiento en la madurez sexual

El inicio de la madurez es una de las etapas más importantes en la historia de vida de los organismos. En peces, generalmente se describe a través de parámetros como son la talla y la edad de una población o un grupo de organismos (Kallman, 1983). En el caso del género *Xiphophorus*, los machos crecen linealmente hasta alcanzar la madurez sexual. La tasa de crecimiento en machos declina con la madurez sexual. Las hembras muestran un patrón similar; aunque éstas continúan creciendo a una tasa menor al alcanzar la madurez sexual. De manera que, el mecanismo por medio del cual se determina la talla del cuerpo adulto debe ser el mismo tanto en machos como en hembras. Sin embargo, la tasa de crecimiento se controla independientemente de la talla del cuerpo (Marcus *et al.*, 1999).

En *X. maculatus* se identificó un gen denominado *P* que se localiza en el cromosoma sexual y controla el inicio del proceso de madurez sexual, es decir la talla o la edad de maduración. De esta forma, la variación de la talla de machos adultos dentro de poblaciones naturales de *X. maculatus* puede reflejar la existencia de diferentes genotipos *P*. Debe tomarse en cuenta que el ambiente interactúa fuertemente con el genotipo *P* (Kallman, 1983).

Se ha estudiado que los peces que maduran más pronto son relativamente pequeños comparados con aquellos peces con genotipos que determinan una maduración tardía y que pueden llegar a ser más del doble de grandes. Al respecto, un análisis genético detallado hecho en *X. montezumae* mostró que estos peces poseen el modo XX ♀♀-XY ♂♂ de determinación sexual. Se observó que el cromosoma Y porta los alelos en el locus *P* que determinan el inicio de la madurez sexual, así como la talla adulta final. Se atribuyó la diferencia de talla en *X. montezumae* a la existencia de dos alelos, *a* y *b* en el locus *P* (Kallman, 1983).

Se observó que al cambiar las condiciones de crianza en el caso de los machos, la talla al alcanzar la madurez se correlacionaba más cercanamente al genotipo que a la edad. Esto es, los individuos heterócigos en el locus P , maduran más tarde alcanzando tallas mayores respecto a aquellos homócigos para el alelo que presentan maduración temprana (Kallman, 1983).

De manera que, existen machos pequeños de maduración temprana y machos grandes de maduración tardía. En este sentido, se ha estudiado que tanto machos grandes como pequeños de *X. montezumae* poseen el genotipo XY. Sin embargo, la talla a la que alcanzan la madurez está determinada por un alelo particular presente en el locus P del cromosoma Y. En poblaciones naturales todos los cromosomas X llevan el alelo a , mientras los cromosomas Y pueden llevar ya sea el alelo a o b (Kallman, 1983). Por tanto, todas las hembras y machos pequeños que maduran temprano deben ser homócigos a, a , mientras los machos más grandes que maduran más tarde deben ser heterócigos $X-a Y-b$ (Kallman, 1983). De acuerdo a las observaciones hechas por Kallman (1983) dentro de poblaciones naturales las hembras maduran a la misma edad y talla que los machos de maduración temprana.

McKenzie (1983) observó en *Xiphophorus maculatus* que aun sí las diferencias en edad y peso a la madurez sexual dentro de una población son muy grandes, éstas diferencias pueden no ser de origen genético. La edad y peso en que ocurre la maduración son altamente variables dentro de un genotipo y están también en función de las condiciones ambientales. De manera que, la interacción ambiente-genotipo puede ser tal, que dentro de una población el ambiente determina el inicio de la madurez de un tipo de genotipo P dado. Por tanto, en peces de diferentes genotipos el inicio de la madurez es diferente en el mismo ambiente.

3. HIPÓTESIS

Sí la tasa de crecimiento y el desempeño de nado son indicadores de la calidad fisiológica de los animales, entonces se observará una relación positiva entre ambas respuestas funcionales.

Los organismos de cada uno de los sexos habitan zonas con presiones hidrodinámicas similares, por lo cual puede esperarse que las velocidades críticas de hembras y machos no difieran, a pesar de la presencia de la espada en éstos últimos. Sin embargo, debido a que para los machos la espada representa una fuerza de arrastre que se opone al nado, debido a lo cual los machos sin espada deben exhibir una mayor capacidad de nado que las hembras. Esto indicaría que los machos poseen un mayor potencial de nado, lo cual les permite compensar la desventaja hidrodinámica asociada a la aleta caudal.

4. OBJETIVOS

- ◆ Estimar y comparar el crecimiento a través de parámetros morfométricos de hembras y machos al término de su etapa juvenil.
- ◆ Estimar y comparar el Factor de Condición y la Razón de Fineza Hidrodinámica de hembras y machos al término de su etapa juvenil.
- ◆ Estimar y comparar la velocidad crítica en machos de *X. montezumae* con y sin espada. Determinar si existe una diferencia significativa en la velocidad crítica de nado entre machos y hembras.
- ◆ Relacionar el desempeño de nado de machos y hembras con la tasa de crecimiento.

5. MÉTODOS

5.1. Colecta

En el presente proyecto se usaron peces de la especie *X. montezumae* colectados en el estado de San Luis Potosí, en el Manantial Capuchinas en Marzo del 2003. El Manantial Capuchinas se localiza a menos de 50 km dirección oeste de Ciudad Valles, en la Huasteca Potosina. Este Manantial desemboca en el Río Capuchinas. Cabe señalar que se observa una capa de lirios que cubren la mayor parte del manantial y del río. La localización del área de colecta está ubicada a los 21°46'30.5'' latitud norte y 99°18'13.2'' longitud oeste, a una altitud de 296 m.s.n.m. En la colecta se registró un pH promedio de 7.0 y una temperatura de 25.4 °C. En cuanto a la velocidad de la corriente en el cuerpo de agua, es muy variable. En las zonas en las cuales se encontró *X. montezumae*, la velocidad de la corriente llegó incluso a ser nula. Sin embargo, en el riachuelo las velocidades de corriente registradas fueron muy bajas (2.3 cm s⁻¹ a 9 cm s⁻¹), después del manantial la velocidad de la corriente llega a ser alta en la salida del agua (30 cm s⁻¹).

Los peces fueron capturados usando una red tipo jábela en las orillas del manantial y del río. Durante el procedimiento de captura, los peces se mantuvieron en pequeños tanques de 2litros de capacidad con agua del sitio de colecta; se hicieron recambios parciales con agua fresca del sitio de colecta y se retiró la acumulación de desechos orgánicos para mantener la calidad del agua. Los animales no recibieron alimento durante los primeros días, ni durante su transporte hacia el Laboratorio de Ecofisiología de la Facultad de Ciencias, U.N.A.M., en la Ciudad de México. En cuanto a las condiciones de transporte, los peces se trasladaron al laboratorio colocando los pequeños tanques dentro de una caja térmica para evitar cambios extremos de la temperatura.

Una vez en el laboratorio, los organismos fueron colocados en tanques de 52 L

indistintamente de su sexo, a una temperatura de 25 °C, y con fotoperíodo de 12:12 h luz-obscuridad. Inicialmente, los peces se mantuvieron con el 50% de agua del sitio de colecta y 50% de agua dulce preparada y gradualmente el agua del Manantial se fue sustituyendo por agua dulce preparada. El agua se preparó haciendo pasar agua potable por un filtro de carbón activo permanente (Omnifilter), posteriormente se añadieron 27 g de cloruro de sodio (sal sin yodo) y 10 ml de acondicionador comercial (acondicionador coloidal para agua dulce y marina Q 219, Pentabiocare, Biomaa) por cada 80 L de agua. En cuanto a la alimentación, se proporcionó a los peces hojuelas (TetraMin, Tropical, Tetra) dos veces al día, complementando con alimento vivo (*Tubifex* previamente desinfectado) cada 15 días. La calidad del agua se mantuvo utilizando filtros externos de cascada (Filtro de Cascada HF-2001, Resun) y filtros biológicos de plataforma en cada tanque. El agua de los tanques se recambió totalmente una vez al mes.

5.2. Selección de muestra y aclimatación

Los peces capturados para el presente proyecto se reprodujeron en condiciones de laboratorio y corresponden a la 1ª generación de la colecta realizada en Marzo del 2003. Las crías utilizadas para el proyecto se tomaron de un tanque de mantenimiento de crías. La selección de los peces se hizo al azar, tomando 12 machos y 12 hembras de la misma edad. Las crías de *X. montezumae* se mantuvieron en tanques de 80 L con agua dulce preparada, a una temperatura de 25 °C, con un fotoperíodo de 12:12 h luz-obscuridad. Las crías se alimentaron dos veces al día con hojuelas (TetraMin, Tropical, Tetra) y adicionalmente con alimento vivo (*Tubifex*) cada 15 días, como se describió anteriormente.

Para realizar los experimentos de crecimiento se colocaron machos y hembras en acuarios distintos. La calidad del agua de los tanques se mantuvo con ayuda

de filtros mecánicos y aireación constante. Los organismos se mantuvieron en estas condiciones por aproximadamente 2 meses, durante los cuales se tomaron registros de su peso y talla cada dos semanas, así como de otras medidas morfométricas que se describen a continuación. Al término del período se dio inicio a las pruebas de nado.

5.3. Registro merístico de los organismos

Los registros de talla y peso de los organismos se tomaron extrayéndolos del agua cada 15 días, tanto para machos como para hembras. Los organismos se pesaron con una balanza digital (Ohaus, Scout II) e inmediatamente después se colocaron en una placa de plástico donde se fotografiaron con una cámara de video digital (Canon MiniDV, Utura). En las imágenes obtenidas se realizaron las mediciones.

Los organismos se fotografiaron al lado de una regla, la cual se tomó como referencia de escala para el análisis de las imágenes. Las imágenes se transfirieron a la PC con el programa Adobe Photoshop CS (versión 8.0.1.). Posteriormente, las fotografías se analizaron utilizando el programa analizador de imágenes ImageJ para Windows (<http://rsb.nih.gov/ij/download.html>).

Las medidas morfométricas registradas fueron las siguientes:

- **Longitud Total (LT).** Comprende el largo del cuerpo del organismo desde la parte central del labio superior hasta el extremo posterior de la aleta caudal, tomando en cuenta el largo de la espada, que forma parte de la aleta caudal.
- **Longitud estándar (LS).** Comprendida entre la parte central del labio superior de la boca y la base de la aleta caudal.
- **Longitud de la extensión (LE).** Distancia desde el extremo anterior de la aleta caudal (en su parte inferior) hasta el extremo posterior de la espada.
- **Extensión de la espada (EE).** Distancia desde el origen de la espada, hasta el extremo posterior de la elongación caudal.

5.4. Velocidad crítica de nado

La velocidad crítica de nado es una medida estándar que permite evaluar la

capacidad de nado de los peces. La velocidad crítica de nado utiliza el tiempo y la velocidad a la cual el organismo se fatiga para calcular la capacidad de los individuos. La velocidad crítica de nado se estimó utilizando la siguiente fórmula (Brett, 1964; 1967):

$$U_{crit} = U_i + [U_{ij}(T_i/T_{ij})]$$

Donde:

U_i= la velocidad más alta mantenida por un intervalo completo (cm s⁻¹)

U_{ij}= la velocidad de incremento (cm s⁻¹)

T_i= el tiempo en el que el organismo alcanzó la velocidad de fatiga (min)

T_{ij}= el intervalo de tiempo predeterminado (min)

Para estimar la velocidad crítica de nado, se construyó un sistema de túnel de nado tipo Brett (Brett, 1964) similar al utilizado por Plaut (2001). El sistema se construyó utilizando acrílico transparente tubular de 1 ¼ pulgadas de diámetro y placa (Fig. 4). El sistema de túnel de nado tipo Brett (1964) utilizado durante la fase experimental consta de diversas secciones (Fig. 4), mismas que se describen de la siguiente manera:

- Un **reservorio de agua (R)**, donde se encuentra la bomba y donde se recibe el agua que sale del sistema.
- Una **bomba (B)** de agua sumergible (SEDRA Sumergible KSP-20000, con una capacidad de flujo máximo de 7500 l/h) para generar el flujo de agua en el sistema.
- Un juego de **válvulas de control de velocidad (V1 y V2)** para liberar la presión y regular el flujo de agua en la entrada principal.
- Una **cámara de turbulencia (Ct)** con un volumen de 3375 cm³, con el fin de disminuir la turbulencia generada por la bomba; esta cámara posee una **válvula de liberación de aire y burbujas (Vb)** en la parte superior.

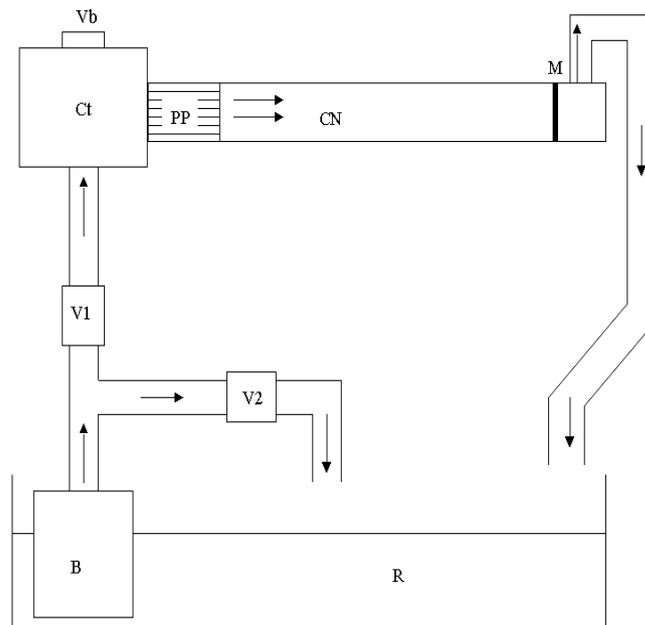


Figura 4. Sistema de túnel de nado tipo Brett (Brett, 1964). Se señalan las secciones del sistema de la siguiente manera: bomba (B), válvula 1 y 2 (V1 y V2), cámara de turbulencia (Ct), válvula de liberación de aire y burbujas (Vb), barrera de popotes (PP), canal de nado (CN), malla (M) y reservorio (R).

- Un **canal de nado (CN)** de 70 x 6 x 7 cm (largo x ancho x alto) medidas que corresponden a un área de nado de 42 cm² y un volumen de 2940 cm³. Así mismo, el túnel posee una **malla (M)** de acero inoxidable en la parte posterior del mismo (para evitar la salida de los organismos del canal de nado). El canal de nado cuenta con una apertura superior y una inferior (para introducir y extraer a los animales). La parte anterior del túnel esta provista de una **barrera de popotes (PP)** de 15 cm de largo y 0.5 cm de diámetro para generar un flujo laminar en el canal.
- El sistema esta provisto de un **flujómetro** (GF SIGNET, 515/2536 Sensor

de flujo de rueda de paletas, Rotor-X) para obtener la medición de la velocidad del flujo.

- Una salida para el flujo de agua hacia el reservorio principal, ubicado en la parte posterior del sistema, después de la malla de acero inoxidable.

Al término del período de evaluación del crecimiento, los organismos se mantuvieron en los acuarios utilizados durante esta fase con las mismas condiciones previamente descritas. Previo al inicio de las pruebas de nado, se verificó la repetibilidad de los registros del sistema. Para ello, el sistema se calibró tomando tres registros de velocidad para cada una de las velocidades experimentales establecidas. Esta calibración del sistema se realizó por una sola persona para evitar sesgo en los datos. El sistema se calibró una vez al día durante el período experimental para verificar el óptimo funcionamiento del sistema. Durante la fase experimental, se suspendió la alimentación de los organismos 24 h previas al inicio de las pruebas de nado. Antes de iniciar las pruebas de nado, los organismos se colocaron en el canal de nado, donde permanecieron durante una hora a una velocidad de 0.5 BL s^{-1} (cuerpos por segundo), misma que corresponde a una velocidad de corriente de aproximadamente 2.2 cm s^{-1} . Este período de aclimatación al sistema permite que los organismos se recobren del estrés de la manipulación (Plaut, 2001). Posterior al período de aclimatación al túnel de nado, se incrementó la velocidad de la corriente a una tasa de 0.5 BL s^{-1} (2.2 cm s^{-1}) en intervalos de tiempo de 5 min. El punto final de la prueba se alcanzó cuando los organismos se fatigaron y como resultado fueron arrastrados a la parte posterior del túnel de nado, permaneciendo en la malla durante un mínimo de 3 s sin recobrar la actividad de nado. En este punto de la prueba se registró el tiempo (s), la velocidad de la corriente (cm s^{-1}) y el intervalo (min) en el cual ocurrió la fatiga, al término de cada prueba de nado se permitió a los organismos descansar unos minutos en el canal de nado antes de retirarlos.

Posteriormente los organismos fueron colocados en una placa de plástico para ser fotografiados y pesados como se describió antes y finalmente fueron

regresados al tanque de mantenimiento correspondiente. Los experimentos de nado se realizaron una vez para cada uno de los 12 machos con espada y cinco veces una vez que la espada fue disectada. En el caso de las hembras, se obtuvieron tres mediciones de velocidad crítica de nado por cada una de las 12 hembras.

5.5. Corte de la espada

El procedimiento de corte de la espada consistió en colocar a los organismos en una placa de plástico estéril que se usó como mesa de disección. En seguida el corte de la espada se realizó en el extremo distal de la aleta caudal de manera rápida y precisa con una navaja desechable y estéril, eliminando exclusivamente la extensión de la espada. Posteriormente a la disección de la espada, los organismos se colocaron en tanques individuales debidamente etiquetados con las mismas condiciones de agua que el resto de los tanques, adicionándoles azul de metileno (All-Blue Azul de metileno Q 307, marca Biomaa) como tratamiento preventivo para evitar infecciones debido al procedimiento. Los organismos permanecieron sin alimento durante 24 h para evitar cualquier infección y estuvieron en observación en este tanque durante una semana. En todos los casos los peces presentaron una recuperación adecuada y pronta, mostrando patrones de alimentación y nado de manera habitual después de un período de aproximadamente 48 h de la disección. Después del período de recuperación al corte de la espada, los organismos fueron regresados a los tanques experimentales y se procedió a realizar las pruebas de nado sin espada.

5.6. Tasa de crecimiento

La tasa de crecimiento en peces, puede representarse matemáticamente de diversas maneras, en este caso, la tasa de crecimiento de los animales se determinó en función del crecimiento absoluto.

Se registró el incremento en peso de W_1 a W_2 durante un período de tiempo entre t_1 y t_2 (período de crecimiento en días) de manera individual tanto para

machos (n=12) como para hembras (n=12). De manera que, la tasa de crecimiento absoluto se estimó utilizando la siguiente fórmula (Jobling, 1994):

$$W_2 - W_1 / t_2 - t_1$$

Para la estimación de la tasa de crecimiento, se utilizaron las mediciones de peso obtenidas durante un período de 75 días (período durante el cual se midieron los organismos). Donde t_1 y t_2 representan el día 1 y día 75 respectivamente. De igual forma W_1 y W_2 corresponden a las mediciones de peso del día 1 y día 75. Los resultados se reportan en unidades de peso (mg/día).

De manera paralela, se estimó la tasa de crecimiento en unidades de longitud (cm/día). Para estimar la tasa de crecimiento en unidades de longitud se utilizaron las mediciones de longitud estándar obtenidas durante el período de medición (75 días). La tasa de crecimiento en unidades de longitud se estimó utilizando la siguiente fórmula:

$$L_2 - L_1 / t_2 - t_1$$

Donde t_1 y t_2 representan el día 1 y día 75 respectivamente. De igual manera L_1 y L_2 corresponden a las medidas de longitud estándar del día 1 y día 75.

5.7. Factor de Condición y Razón de Fineza Hidrodinámica

Los peces adultos son típicamente más pesados por unidad de longitud que los juveniles, esto se ve reflejado en un factor de condición mayor (K), donde:

$$K = ((W \times 100) / L^3)$$

Donde W es el peso y L la longitud estándar de cada pez (Chellappa *et al.*, 1995). El Factor de Condición, es un indicador de salud de la población (Moyle y Cech, 2000).

La Razón de Fineza Hidrodinámica fue utilizada como una estimación de la forma hidrodinámica de los organismos basada en la relación entre la longitud estándar y la altura máxima del cuerpo en cada individuo. La Razón de Fineza Hidrodinámica se representa:

$$F = L/A$$

Donde L es la longitud estándar del organismo y A la altura máxima (Jobling,

1995).

6. RESULTADOS

Durante las fases de mantenimiento, aclimatación y durante la fase experimental, las condiciones fisicoquímicas del agua se mantuvieron estables de acuerdo a los parámetros establecidos. Durante dichos períodos, los peces se mantuvieron sanos, sin presentar signos de parasitismo o enfermedad. Así mismo, no se presentó mortalidad de los peces durante los períodos mencionados. El tratamiento de los peces durante los experimentos, en particular las pruebas de nado y el corte de la espada, no causaron alteraciones conductuales aparentes, ni afectaron el estado de salud de los peces. Los machos no mostraron infección después del corte de la espada, éstos se mantuvieron en observación durante una semana con las condiciones previamente descritas y recuperaron su conducta habitual inmediatamente después de haber regresado a su tanque de mantenimiento. Ninguna de las hembras tuvo crías durante los experimentos, lo cual sugiere que los peces fueron aislados en su etapa juvenil, o bien antes de alcanzar la madurez sexual.

Crecimiento

En la etapa en la que los peces fueron separados, los machos presentaban una talla promedio de 4.29 cm de longitud estándar y 1.86 g de peso húmedo, mientras que los valores para las hembras fueron 4.24 cm y 1.88 g respectivamente. No se observaron diferencias significativas en el peso y la longitud estándar entre hembras y machos al inicio de esta etapa (Prueba de t, $P= 0.29$, $P= 0.23$, respectivamente; Fig. 5a y 5b).

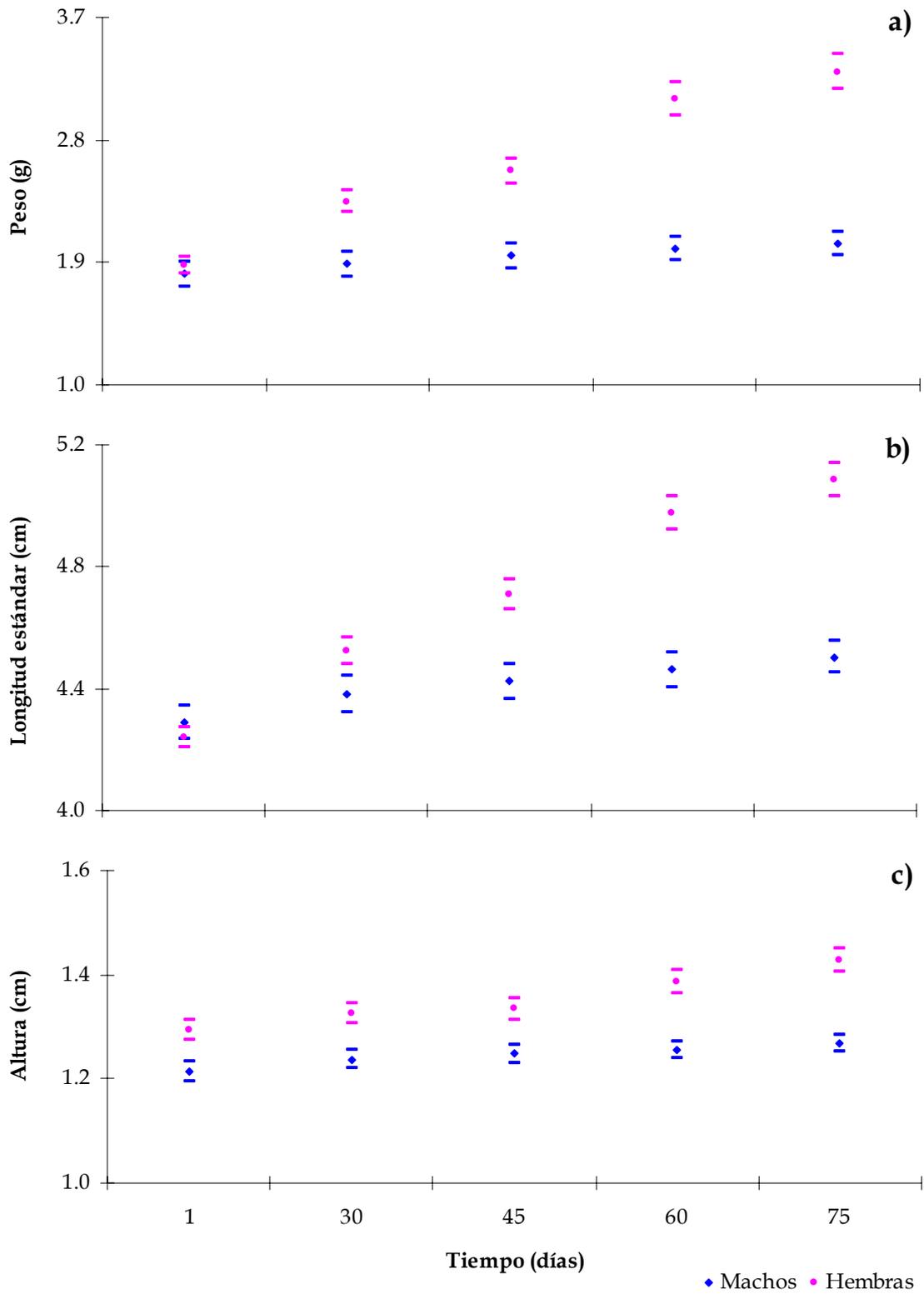


Figura 5. Talla de machos y hembras de *X. montezumae* a lo largo de un período de 75 días.; a) peso (g); b) longitud estándar (cm) y c) altura (cm). Se señalan los valores promedio y error estándar.

Al término de la fase juvenil, las hembras y los machos presentaron tallas similares; sin embargo, las hembras mostraron una altura del cuerpo significativamente mayor (7.9%) respecto de los machos (Prueba de t, $P = 0.004$; Fig. 5c). Mientras que el peso y la longitud estándar registrados al término del período de crecimiento para hembras y machos difirieron significativamente (Prueba de t, $P < 0.001$; y $P < 0.001$, respectivamente). Es decir, después de 75 días las hembras pesaron 38.3% más que los machos y fueron 11.4% más largas que estos (Fig. 5a y 5b). En cuanto a la altura máxima del cuerpo, las hembras mostraron tener 11.3% mayor altura del cuerpo que los machos (Prueba de t, $P < 0.001$). Estos resultados indican que mientras que los machos tienden a alcanzar una longitud estándar y un peso máximos, las hembras continúan su crecimiento.

Relaciones merísticas

La relación entre el peso y la longitud estándar, conocida como Factor de Condición que se registró en las medidas iniciales de los organismos fue diferente entre machos y hembras. Las hembras tendieron a mostrar un Factor de Condición mayor que el de los machos (Prueba de t, $P = 0.015$; Fig. 6).

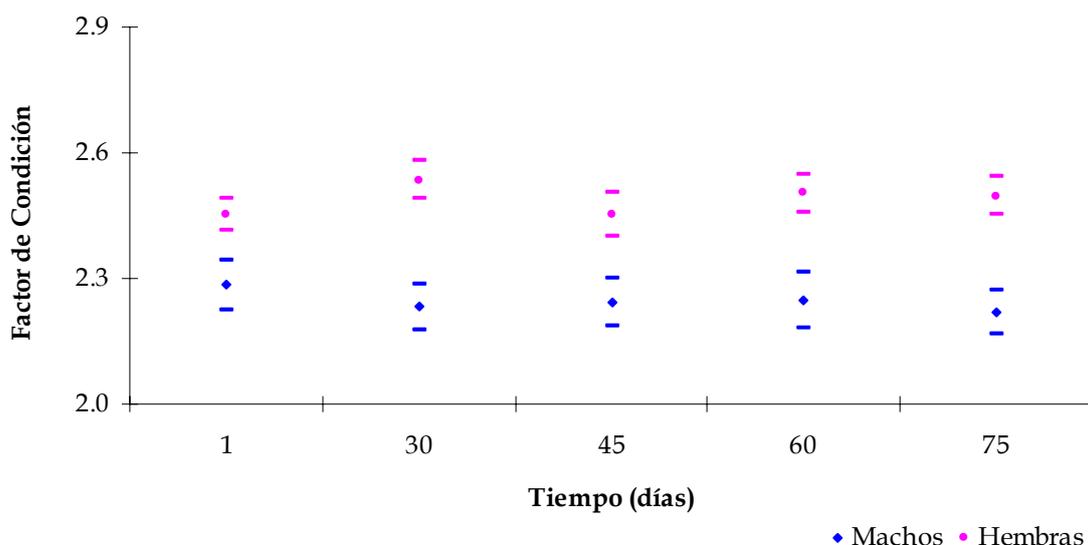


Figura 6. Factor de Condición de machos y hembras de *X. montezumae* a lo largo de un período de 75 días. Se presentan valores promedio y error estándar.

Al término de este período, el Factor de Condición de las hembras fue significativamente mayor que el de los machos (Prueba de t, $P = 0.0002$; Fig. 6). En el caso de los machos la Razón de Fineza Hidrodinámica en las mediciones iniciales fue mayor que el de las hembras (Prueba de t, $P < 0.001$; Fig. 7). Sin embargo, transcurrido el período de 75 días la Razón de Fineza Hidrodinámica fue similar para ambos sexos (Prueba de t, $P = 0.41$; Fig. 7).

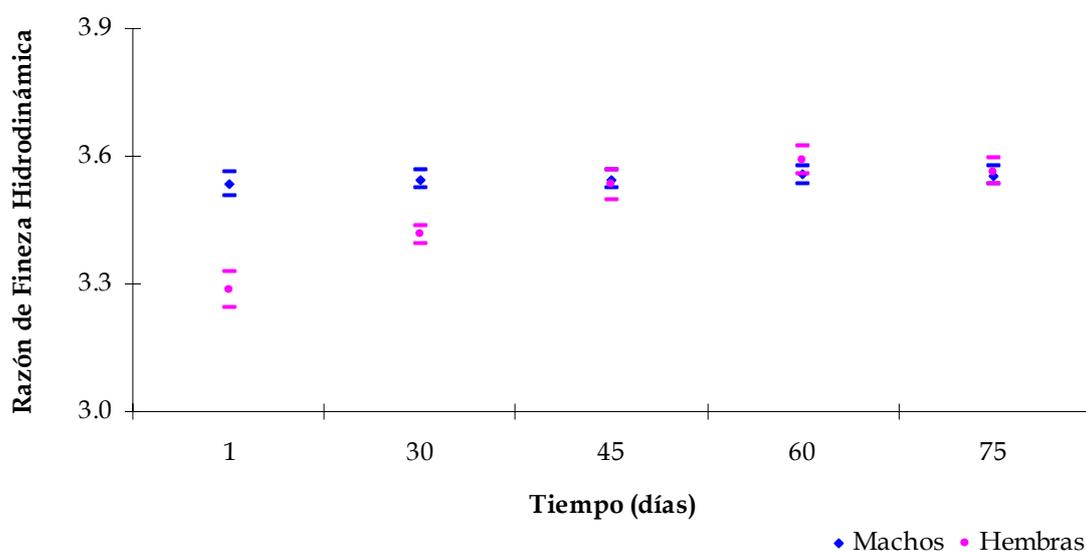


Figura. 7. Razón de Fineza Hidrodinámica de machos y hembras de *X. montezumae* a lo largo de un período de 75 días. Se presentan valores promedio y error estándar.

Velocidad crítica de nado

La velocidad crítica de nado de las hembras y los machos se estimó en organismos de edad similar (45 días después del inicio de los experimentos de crecimiento); sin embargo, la talla (LS) de las hembras al momento en que se midió la velocidad crítica fue 6.08% mayor que la de los machos (Prueba de t, $P = 0.0006$; Fig.5b). No se observaron diferencias significativas en el peso de los machos antes y después de dos semanas de cortar la espada (Prueba de t, $P = 0.29$). La velocidad crítica de los machos sin la espada fue significativamente mayor que la velocidad crítica máxima de los machos con la estructura (Prueba de t, $P = 0.013$).

Mientras que la velocidad crítica de los machos sin la espada fue similar a la velocidad crítica máxima de las hembras (Prueba de t, $P = 0.34$). Así mismo, no se observaron diferencias significativas entre la velocidad crítica máxima de machos con la espada y las hembras (Prueba de t, $P = 0.52$; Fig. 8).

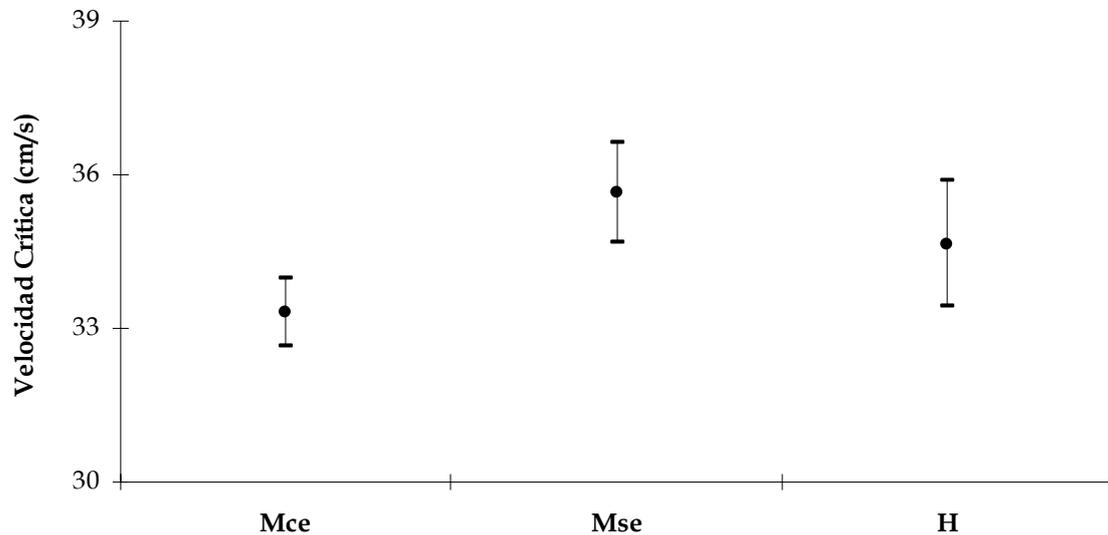


Figura 8. Velocidad crítica de machos con espada (Mce), machos sin espada (Mse) y hembras (H) de *X. montezumae* de la misma edad. Se señalan los valores promedio y su error estándar.

Relación entre la velocidad crítica y el peso y la longitud estándar

No se observó una correlación entre la velocidad crítica (cm/s) y el peso (g) de los organismos tanto en machos como en hembras ($R^2 = 0.05$ y $R^2 = 0.19$; respectivamente, Fig. 9a). Así mismo, no existe una correlación entre la velocidad crítica y la longitud estándar de los organismos tanto en machos como en hembras ($R^2 = 0.12$ y $R^2 = 0.41$; respectivamente, Fig. 9b).

Relación entre la tasa de crecimiento y la velocidad crítica

No se observó una correlación positiva entre la tasa de crecimiento en unidades de peso (g/día) de los machos individuales y la velocidad crítica (cm/s) alcanzada por estos ($R^2 = 0.04$; Fig. 10a).

Así mismo, no se registró una correlación entre la tasa de crecimiento en unidades de longitud estándar (cm/día) de los machos individuales y la velocidad crítica (cm/s) de estos ($R^2 = 0.35$; Fig. 10b).

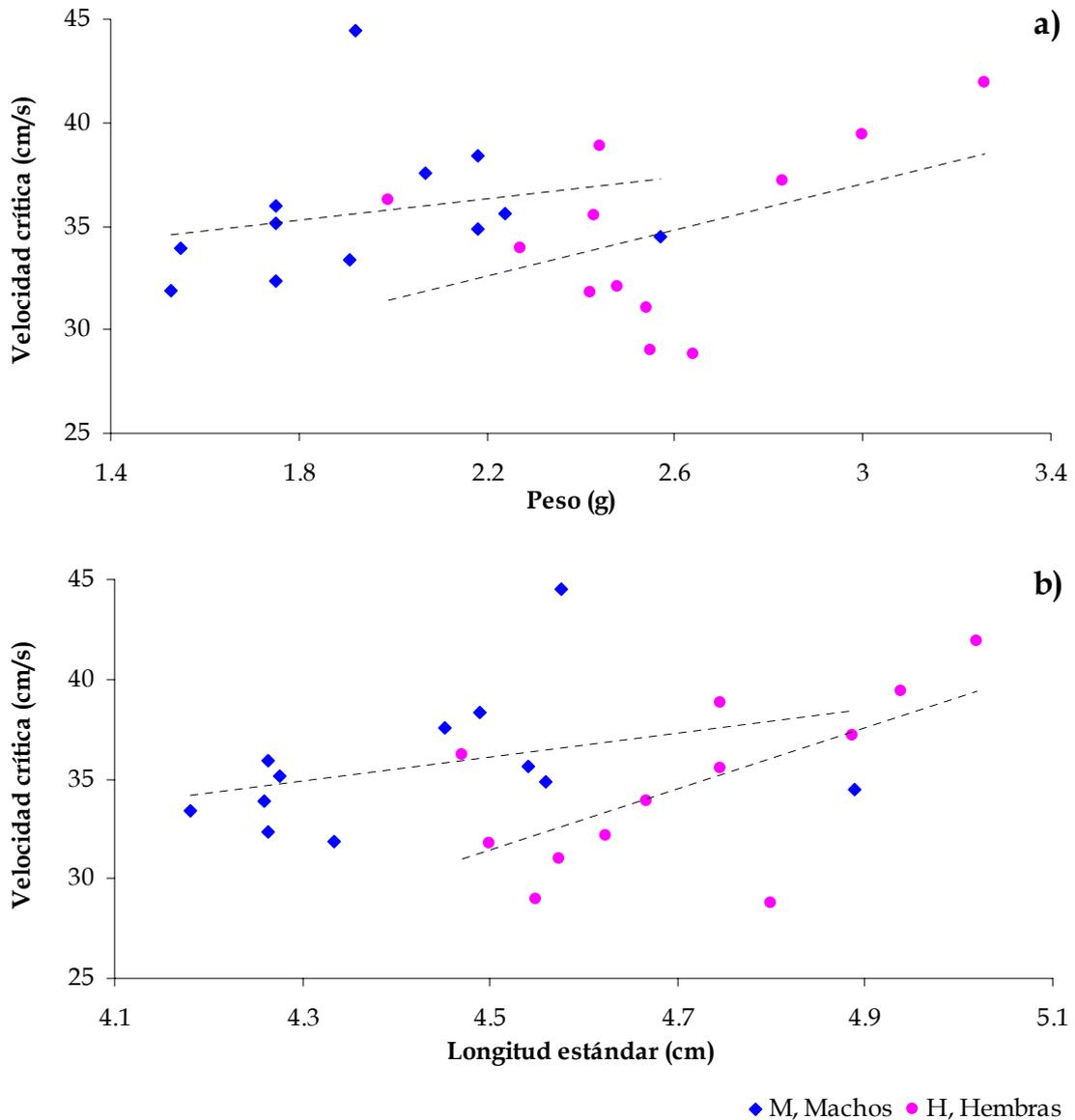


Figura 9. Relación de la velocidad crítica (cm/s) en función de: a) el peso (g) y b) la longitud estándar (cm), tanto en machos sin espada como en hembras de *X. montezumae*.

Por otra parte, no se encontró una correlación entre la tasa de crecimiento en unidades de peso de las hembras individuales y la velocidad crítica máxima (cm/s) alcanzada por estas ($R^2 = 0.04$; Fig. 10a).

Así mismo, no se observó una correlación en el cálculo del coeficiente de correlación entre la tasa de crecimiento en unidades de longitud estándar de las hembras individuales y la velocidad crítica máxima (cm/s) alcanzada por estas ($R^2 = 2E -06$; Fig. 10b).

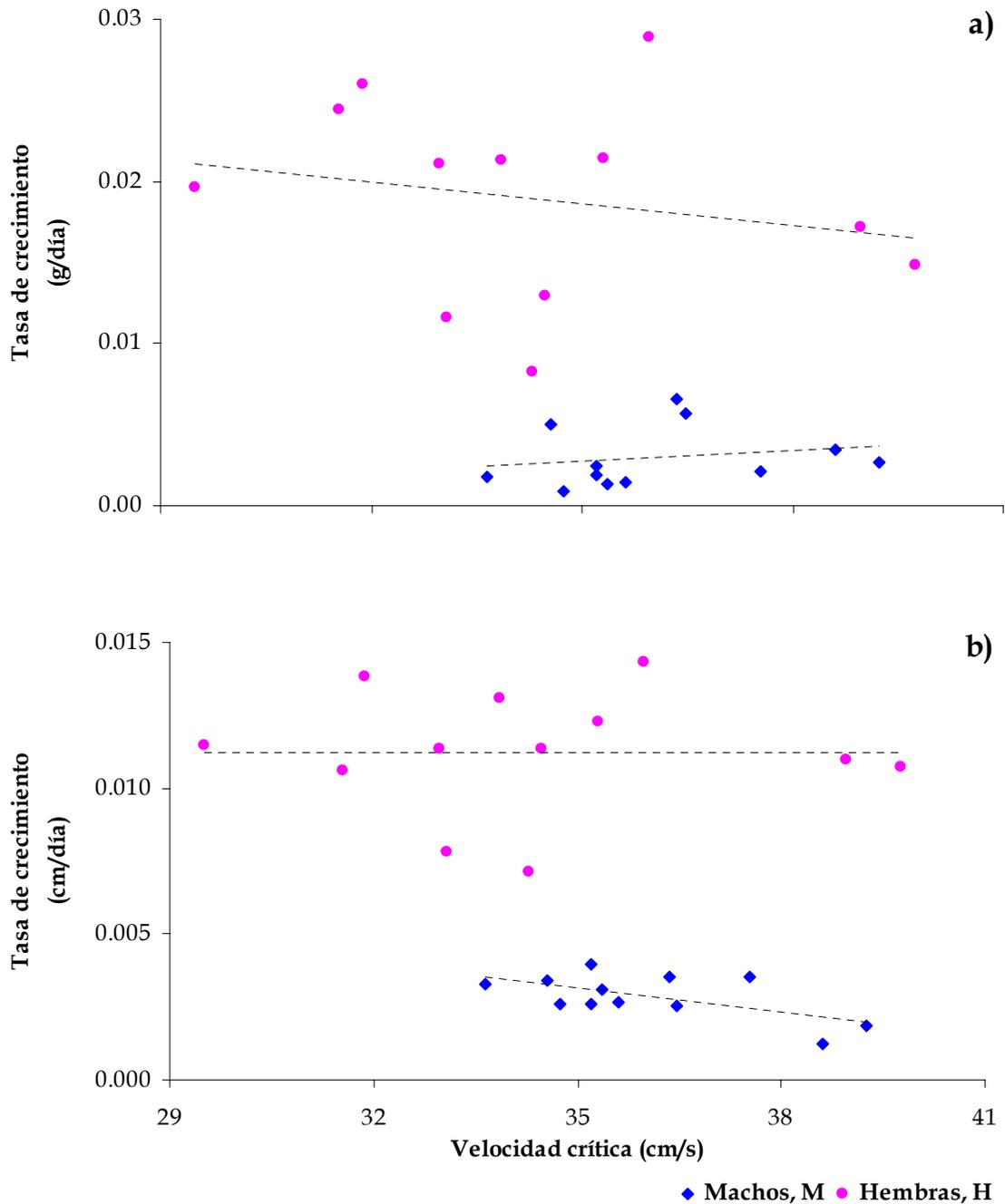


Fig. 10. Relación entre la velocidad crítica (cm/s) con la tasa de crecimiento en unidades de: a) peso (g/día) y b) longitud estándar (cm/día), tanto en machos, como en hembras de *X. montezumae*.

7. DISCUSIÓN

La tendencia morfométrica estimada a través de la razón de fineza hidrodinámica muestra que los machos tendieron a conservar su forma hidrodinámica a lo largo de un período de 75 días. Mientras que en el caso de las hembras se observa que estas tendieron a adquirir una forma más hidrodinámica hacia el final de éste período. Esto está relacionado con el tipo de crecimiento de los organismos, los machos mostraron una tasa de crecimiento menor en unidades de longitud estándar (0.0029 cm/día) que las hembras (0.0113 cm/día). Las hembras presentaron un incremento en longitud estándar 74.3 % mayor respecto al incremento registrado en machos. Adicionalmente, la altura de las hembras al término de este período fue 60.5 % mayor que la de los machos. Esto dio como resultado la tendencia de las hembras a adquirir una forma más hidrodinámica por el mayor incremento en longitud estándar respecto a la altura. Así, las hembras mostraron un incremento en la razón de fineza hidrodinámica de 3.28 a 3.56 al finalizar el período de 75 días. Urrutia (2004), reportó para crías de *X. montezumae* valores de razón de fineza hidrodinámica que se incrementaron de 3.18 a 3.5 similares a los obtenidos en el presente estudio, lo cual indica que la forma hidrodinámica de estos organismos tiende a incrementarse desde etapas tempranas.

De acuerdo a la literatura, el valor de la razón de fineza hidrodinámica que disminuye al máximo el arrastre es 4.5 veces tan larga como su altura máxima (Jobling, 1995). En peces pelágicos activos, tal como salmónidos y escómbridos, se presentan valores de razón de fineza hidrodinámica cercanos a 4.5. Lo cual indica que presentan formas hidrodinámicamente eficientes (Jobling, 1995). De manera que, la forma hidrodinámica de *X. montezumae* a pesar de ser alta (3.28) no es suficiente para tener una forma hidrodinámica óptima y disminuir el arrastre generado durante el nado.

No obstante, es importante destacar que el no tener una forma totalmente hidrodinámica no es una desventaja, debido a que en peces los cuerpos más

altos tienen ventajas en las actividades que requieren maniobras (Pettersson *et al.*, 1999). Los peces del género *Xiphophorus* basan muchas de sus respuestas conductuales y reproductivas en las actividades de maniobra, en particular *X. montezumae* desempeña actividades de cortejo complejas respecto a especies del mismo género (Haas, 1993).

Una de las hipótesis de este estudio supone que dado que la espada representa una fuerza de arrastre que se opone al nado, una vez que la estructura es eliminada el organismo será capaz de nadar a una mayor velocidad. Los resultados obtenidos soportan nuestra hipótesis indicando que la espada en los machos representa costos en la locomoción, es decir, al eliminar la espada, se disminuye el arrastre generado por misma. Lo anterior concuerda con un estudio realizado en el pez zebra (*Danio rerio*, ahora *Brachydanio rerio*) se estimó la velocidad crítica de nado en 3 morfotipos de la especie que difieren en la forma de su aleta caudal. Los resultados mostraron que el tipo silvestre con aleta caudal corta presentó valores de velocidad crítica de nado mayores ($56.0 \pm 4.8 \text{ cm s}^{-1}$), respecto a los mostrados por el morfotipo de aleta larga ($43.7 \pm 6.8 \text{ cm s}^{-1}$) y los mostrados por el tercer morfotipo sin aleta caudal (19.8 ± 4.7). Sugiriendo que el morfotipo de aleta larga fue más afectado por las fuerzas de arrastre y por lo tanto fue el nadador menos eficiente (Plaut, 2000). Las aletas largas poseen áreas de superficie mayores que incrementan los efectos de las fuerzas de arrastre, con lo cual se disminuye la capacidad de nado. Por otro lado, la menor velocidad crítica observada en los organismos sin aleta caudal se asocia a que las aletas son los principales transmisores de momentum desde los músculos hacia el agua. En ausencia de aleta caudal, como en el caso del tercer morfotipo, el área activa que empuja el agua se reduce substancialmente; disminuyendo la capacidad de nado (Plaut, 2000).

De acuerdo a la literatura, la talla del cuerpo es un carácter importante que puede influenciar el desempeño locomotor en los organismos (Kolok, 1999). En peces la relación entre la talla del cuerpo y la velocidad de nado tiende a ser

alométrica (Brett, 1965). Así mismo, se ha reportado que la velocidad crítica de nado de los peces se relaciona de manera positiva con la talla de los mismos (Beamish, 1978). En este estudio, la velocidad de nado de los peces, de machos y hembras, no se relacionó con la talla. Esto podría atribuirse a que los peces utilizados en el experimento fueron de edad y tallas muy parecidas. Las diferencias en peso y longitud estándar entre los organismos experimentales fueron menores de 1 g y 1 cm, respectivamente. Esto, aunado a posibles diferencias en algunas otras particularidades individuales, como el largo de la espada en el caso de los machos, diferencias metabólicas entre individuos, podría explicar la baja relación entre la velocidad de nado y la talla.

Hasta donde sabemos, hembras y machos de esta especie habitan bajo condiciones hidrodinámicas similares, es decir en ambientes lénticos con corriente de agua moderada. Los datos obtenidos en este estudio muestran que la velocidad crítica de nado de machos (con la espada) y de las hembras es similar. Esto concuerda con la hipótesis planteada. Es decir, si la velocidad de la corriente es un factor al que se exponen igualmente machos y hembras, entonces se esperaría que su capacidad de nado sea similar. Sin embargo, tal y como lo plantea la hipótesis de este estudio, la velocidad crítica de los machos aumentó significativamente una vez que se eliminó la estructura. La espada es una elongación de la aleta caudal de los machos que incrementa su área corporal, y con esto el arrastre que genera el organismo al mantener una posición en contra de la corriente de agua. Es decir, esta estructura representa un costo hidrodinámico para los machos de esta especie (Kruesi & Alcaraz, 2007).

Sin embargo, de acuerdo a los resultados de este estudio es posible sugerir que la presencia de la estructura es compensada por algún mecanismo morfológico y/o funcional por los machos. Es decir, hembras y machos muestran el mismo desempeño de nado, aun cuando para los machos existe un costo

hidrodinámico asociado a la elongación de su aleta caudal.

Los mecanismos por los cuales los machos podrían compensar el costo hidrodinámico asociado a la espada pueden ser de dos tipos: morfológicos y funcionales. El mecanismo de compensación morfológica más evidente es la forma del cuerpo, sin embargo los resultados de este estudio muestran que la forma hidrodinámica del cuerpo de ambos sexos es similar. A pesar de que los datos que registramos descartan diferencias en la razón de fineza hidrodinámica de los peces, la compensación podría asociarse a diferencias morfológicas menos evidentes.

Por otro lado, los mecanismos de compensación de los machos para igualar el desempeño de nado de las hembras (a pesar de portar el ornamento) podrían ser funcionales. Es decir, los machos podrían tener un potencial funcional superior al de las hembras. Estas diferencias funcionales entre sexos podrían estar ligadas a diferencias morfo-funcionales de la musculatura, diferencias en el potencial metabólico o de algunos sistemas u órganos particulares (e.g. circulatorio, respiratorio, etc.). Sin embargo, los datos obtenidos en este estudio no nos permiten explicar este hecho.

Dado que tanto la velocidad crítica de nado, como la tasa de crecimiento se consideran medidas del desempeño metabólico de los animales, se esperaba que en este estudio ambas respuestas estuvieran relacionadas significativamente. Sin embargo, los datos obtenidos de las hembras no apoyaron la hipótesis planteada. La respuesta observada se podría asociar a una disyuntiva en la distribución energética a los dos procesos metabólicos (actividad y desarrollo).

De acuerdo a la literatura, las células y tejidos dividiéndose o incrementándose en tamaño no pueden realizar funciones maduras simultáneamente a una máxima eficiencia. Por tanto, los individuos con mayor tasa de crecimiento desempeñarán una variedad de funciones menos eficientemente que aquellos que presentan crecimiento lento. De manera que, los animales que presentan

crecimiento rápido podrían nadar de manera menos eficiente que aquellos de crecimiento lento como lo sugiere Kallman (1983). A este respecto, la estrategia de cambio de asignación energética propuesta por Wieser y colaboradores (1988) señala que existe una disyuntiva entre altas tasas de crecimiento y elevados niveles en la actividad de nado en peces. Esto último podría explicar porque no se encontró una correlación entre la tasa de crecimiento y el desempeño de nado tanto en machos como en hembras de *X. montezumae*. Resultados similares han sido reportados para algunas otras especies. Por ejemplo, Kolok & Oris (1995) encontraron una relación negativa entre la tasa de crecimiento y la velocidad crítica de nado absoluta en hembras subadultas *Pimephales promelas*. De manera similar, Gregory & Wood (1998) encontraron una correlación negativa entre la tasa de crecimiento y la velocidad crítica de nado relativa en juveniles de trucha arcoiris (*Salmo gairneri*) alimentados con una dieta deficiente y una correlación no significativa en peces alimentados a satisfacción. Así, a pesar de que el crecimiento mas rápido puede proveer ventajas sociales a los peces al mismo tiempo puede reducir su eficiencia de nado (Kolok, 1999).

8. CONCLUSIONES

- ◆ El crecimiento en unidades de peso, longitud estándar y altura mostró un mayor incremento en las hembras respecto al mostrado por los machos.

- ◆ El Factor de Condición de las hembras fue mayor que el de los machos.
- ◆ La Razón de Fineza Hidrodinámica de las hembras se incrementó con el tiempo, mientras que éste índice no se modificó en los machos, esto es, se mantuvo sin cambios evidentes.

- ◆ La velocidad crítica de nado de los machos sin espada fue mayor respecto a la mostrada por machos con la estructura.

- ◆ La velocidad crítica de nado en hembras fue similar a la mostrada tanto en machos con espada, como en machos sin espada.

- ◆ No se observó relación entre el desempeño de nado respecto a la tasa de crecimiento de machos y hembras.

9. LITERATURA CITADA

- Abrahams, M. V. 1993. The trade-off between foraging and courting in male guppies. *Anim. Behav.*, **45**, 673-681.
- Basolo, A. L. 1990a. Female preference pre-dates the evolution of the sword in swordtail fish. *Science*, **250**, 808-810.
- Basolo, A. L. 1990b. Female preference for male sword length in the green swordtail, *Xiphophorus helleri* (Pisces: Poeciliidae). *Anim. Behav.*, **40**, 332-338.
- Basolo, A. L. 1995a. A further examination of a pre-existing bias favouring a sword in the genus *Xiphophorus*. *Anim. Behav.*, **50**, 365-375.
- Basolo, A. L. 1995b. Phylogenetic evidence for the role of a pre-existing bias in sexual selection. *Proc. R. Soc. Lond.*, B **259**, 307-311.
- Basolo, A. L. 1998. Evolutionary change in a receiver bias: a comparison of female preference functions. *Proc. R. Soc. Lond.*, **265**, 2223-2228.
- Basolo, A. L. & G. Alcaraz. 2003. The turn of the sword: length increases the cost of courtship in swordtails. *Proc. R. Soc. Lond.*, B **270**, 1631-1636.
- Beamish, F. W. H. 1978. *Swimming capacity*. In Hoar, W. S., Randall, J. D. (Eds.). *Fish Physiology*, vol. 7. Academic Press Inc. New York. pp. 101-187.
- Bell, W. H. & Terhune, L. D. B. 1970. Water tunnel design for fisheries research. *Fish. Res. Bd. Can. Tech. Rep.*, **195**, 1-69.
- Björnsson, B. 1993. Swimming speed and swimming metabolism of Atlantic cod (*Gadus morhua*) in relation to available food: a laboratory study. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **50**, 2542-2551.
- Bone, Q. & Marshall, N. B. 1982. *Biology of fishes*. Blackie & Son. New York. pp. 46-60.
- Borowsky, R. L. 1973a. Social control of adult size in males of *Xiphophorus variatus*. *Nature*, **245**, 332-335.
- Borowsky, R. L. 1973b. Relative size and the development of fin coloration in *Xiphophorus variatus*. *Physiol. Zool.*, **46**, 22-28.

- Brett, J. R. 1964. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **21**, 1183-1226.
- Brett, J. R. 1965. The relation of size to rate of oxygen consumption and sustained swimming speed of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **22**, 1491-1501.
- Brett, J. R. 1967. Swimming performance of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to fatigue time and temperature. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **24**, 1731-1741.
- Chellappa, S., Huntingford, F. A., Strang, R. H. C. & Thomson, R. Y. 1995. Condition factor and hepatosomatic index as estimates of energy status in male three-spined stickleback. *J. Fish. Biol.*, **47**, 775-787.
- Cutts, C. J., Metcalfe, N. B. & Taylor, A. C. 1998. Aggression and growth depression in juvenile Atlantic salmon: the consequences of individual variation in standard metabolic rate. *J. Fish. Biol.*, **52**, 1026-1037.
- Espinoza, H. P. *et al.* 1993. Listados faunísticos de México III. Los peces dulceacuícolas mexicanos. Depto. De Zoología, I. B. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Gallego, A. & Heath, M. 1997. The effect of growth-dependent mortality, external environment and internal dynamics on larval fish otolith growth: An individual-based modelling approach. *J. Fish. Biol.*, **A 51**, 121-134.
- Gregory, T. R. & Wood, C. M. 1998. Individual variation and interrelationships between swimming performance, growth rate, and feeding in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **55**, 1583-1590.
- Gómez, J. L., Guzmán, J. L. & Olvera, A. 1999. Reproducción y crecimiento de *Heterandria bimaculata* (Cyprinodontiformes: Poeciliidae) en la Laguna "El Rodeo", Morelos, México.
- Gordon, M. S., Chin, H. G. & Vojkovich, M. 1989. Energetics of swimming in fishes using different methods of locomotion: I. Labriform swimmer. *Fish. Physiol. Biochem.*, **6**, 341-352.

- Haas, V. 1993. *Xiphophorus* phylogeny, reviewed on the basis of the courtship behavior. In: *Trends in Ichthyology* (Ed. By J. H. Schroder, J. Bauer & M. Schartl). London. pp.279-288.
- Jobling, M. 1994. *Fish bioenergetics*. Chapman & Hall. London. 309pp.
- Jobling, M. 1995. *Environmental Biology of Fishes*. Chapman & Hall. Great Britain. 450pp.
- Kallman, K. 1983. The sex-determining mechanism of the poeciliid fish, *Xiphophorus montezumae*, and the genetic control of the sexual maturation process and adult size. *Copeia*, **1983**, 755-769.
- Kiceniuk, J. W. & Jones, D. R. 1977. The oxygen transport system in trout (*Salmo gairdneri*) during sustained exercise. *J. Exp. Biol.*, **69**, 247-260.
- Kolok, A. S. 1991. Photoperiod alters the critical swimming speed of juvenile largemouth bass, *Micropterus salmoides*, acclimated to cold water. *Copeia*, **1991**, 1085-1090.
- Kolok, A. S. 1992. The swimming performances of individual largemouth bass (*Micropterus salmoides*) are repeatable. *J. Exp. Biol.*, **170**, 265-270.
- Kolok, A. S. & Farrell, A. P. 1994. Individual variation in the swimming performance and cardiac performance of northern squawfish, *Ptychocheilus oregonensis*. *Physiol. Zool.*, **67**, 706-722.
- Kolok, A. S. & Oris, J. T. 1995. The relationship between specific growth rate and swimming performance in male fathead minnows (*Pimephales promelas*). *Can. J. Zool.*, **73**, 2165-2167.
- Kolok, A. S. 1999. Interindividual variation in the prolonged locomotor performance of ectothermic vertebrates: a comparison of fish and herpetofaunal methodologies and a brief review of the recent fish literature. *Can. Fish. Aquat. Sci.*, **56**, 700-710.
- Kruesi, K. 2004. Desempeño de nado en machos de *Xiphophorus montezumae*: el costo de un ornamento. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM.

- Kruesi, K. & Alcaraz, G. 2007. Does a sexually selected trait represent a burden in locomotion? *J. Fish. Biol.*, **70**, 1161-1170.
- Lester, N. P., Shuter, B. J. & Abrams, P. A. 2004. Interpreting the von Bertalanffy model of somatic growth in fishes: the cost of reproduction. *Proc. R. Soc. Lond., B* **271**, 1625-1631.
- Lowe, C. G. 1996. Kinematics and critical swimming speed of juvenile scalloped hammerhead sharks. *J. Exp. Biol.*, **199**, 2605-2610.
- Mangel, M. & Stamps, J. 2001. Trade-offs between growth and mortality and the maintenance of individual variation in growth. *Evol. Ecol. Res.*, **3**, 583-593.
- Marcus, J. M. & McCune, A. R. 1999. Ontogeny and phylogeny in the northern swordtail clade of *Xiphophorus*. *Syst. Biol.*, **48**(3), 491-522.
- Mayden, R. L. 1987. Agonistic behavior and social inhibition of maturation in fishes of the genus *Xiphophorus* (Poeciliidae). *Copeia*, **1987**, 792-796.
- McKenzie, Jr. W. D., Crews, D., Kallman, K. D., Polikansky, D. & Sohn, J. J. 1983. Age, weight and the genetics of sexual maturation in the platyfish, *Xiphophorus maculatus*. *Copeia*, **1983**, 770-774.
- Meyer, A., Morrissey, J. M. & Scharl, M. 1994. Recurrent origin of a sexually selected trait in *Xiphophorus* fishes inferred from a molecular phylogeny. *Nature*, **368**, 539-541.
- Milligan, C. L., Hooke, G. B. & Johnson, C. 2000. Sustained swimming at low velocity following about of exhaustive exercise enhances metabolic recovery in rainbow trout. *J. Exp. Biol.*, **203**, 921-926.
- Nelson, J. A. 2002. Beyond U_{crit} : matching swimming performance tests to the physiological ecology of the animal, including a new fish 'drag strip'. *Comp. Biochem. Physiol., A* **133**, 289-302.
- Nelson, J. S. 1994. *Fishes of the world*. 3rd Edition. John Wiley and Sons, Inc. New York. 600pp.
- Nelson, J. S. 2006. *Fishes of the world*. 4th Edition. John Wiley and Sons, Inc. New York. 600pp.

- Nicoletto, P. F. y Kodric-Brown, A. 1999. The relationship among swimming performance, courtship behavior, and carotenoid pigmentation of guppies in four rivers of Trinidad. *Env. Biol. Fish.*, **55**, 227-235.
- Peake, S., Barth, C. & McKinley R. S. 1997. Effect of recovery parameters on critical swimming speed of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Can. J. Zool.*, **75**, 1724-1727.
- Pettersson, L. B. & Brönmark, C. 1999. Energetic consequences of an inducible morphological defense in crucian carp. *Oecologia*, **121**, 12-18.
- Plaut, I., & Gordon, M. S., 1994. Swimming metabolism of wild-type and cloned zebrafish *Brachydanio rerio*. *J. Exp. Biol.*, **194**, 209-223.
- Plaut, I. 2000. Effect of fin size on swimming performance, swimming behaviour and routine activity of zebrafish *Danio rerio*. *J. Exp. Biol.*, **203**, 813-820.
- Plaut, I. 2001. Critical swimming speed: its ecological relevance. *Comp. Biochem. Physiol.*, A **131**, 41-50.
- Rauchenberger, M., Kallman, K. D. & Morizot, D. C. 1990. Monophyly and geography of the Río Pánuco Basin swordtails (genus *Xiphophorus*) with descriptions of four new species. *Am. Mus. Nat. Hist. Novit.*, **2974**, 1-41.
- Reidy, S. P., Kerr, S. R. & Nelson, J. A. 2000. Aerobic and anaerobic swimming performance of individual Atlantic cod. *J. Exp. Biol.*, **203**, 347-357.
- Rodríguez, C. ML. 1997. Phylogenetic analysis of the tribe Poeciliini (Cyprinodontiformes: Poeciliidae). *Copeia*, **4**, 663-679.
- Rosen, D. E. & Bailey, R. M. 1963. The poeciliid fishes (Cyprinodontiformes), their structure, zoogeography and systematics. *Bull. Amer. Mus. Hist.*, **126**, 1-176.
- Royle, N. J., Lindström, J. & Metcalfe, N. B. 2005. A poor start in life negatively affects dominance status in adulthood independent of body size in green swordtails *Xiphophorus helleri*. *Proc. R. Soc.*, B **272**, 1917-1922.
- Royle, N. J., Lindström, J. & Metcalfe, N. B. 2006. Effect of growth compensation on subsequent physical fitness in green swordtails *Xiphophorus helleri*. *Biol. Lett.*, **2**, 39-42.

- Ryan, M. J., Hews, D. K. & Wagner Jr., W. E. 1990. Sexual selection on alleles that determine body size in the sword tail *Xiphophorus nigrensis*. *Behav. Ecol. Sociobiol.*, **26**, 231-238.
- Sohn, J. J. 1977b. Socially induced inhibition of genetically determined maturation in the platyfish, *Xiphophorus maculatus*. *Science*, **195**, 199-200.
- Urrutia, V. E. 2004. Variación de la tasa de alimentación, crecimiento y morfología de peces cola de espada (*Xiphophorus montezumae*), expuestos a diferentes velocidades de corriente. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM.
- Wang, N., Hayward, R. S., & Noltie, D. B. 1998. Variation in food consumption, growth, and growth efficiency among juvenile hybrid sunfish held individually. *Aquaculture*, **167**, 43-52.
- Watkins, T. B. 1996. Predator-mediated selection on burst swimming performance in tadpoles of the Pacific tree frog, *Pseudacris regilla*. *Physiol. Zool.*, **69**, 154-167.
- Webb, P. W. 1993b. The effect of solid and porous channel walls on steady swimming of steelhead trout *Oncorhynchus mykiss*. *J. Exp. Biol.* **178**, 97-108.
- Wiens, J. J. & Morris, M. R. 1996. Character definitions, sexual selection, and the evolution of swordtails. *Am. Nat.*, **147**, 866-869.