

# La Trucha Dorada Mexicana

**ARTURO RUIZ-LUNA  
FRANCISCO JAVIER GARCÍA-DE LEÓN**

**Editores**



# **LA TRUCHA DORADA MEXICANA**

**ARTURO RUIZ-LUNA**

**FRANCISCO JAVIER GARCÍA-DE LEÓN**

**Editores**

---





**Primera edición: diciembre 2016**

**Derechos Reservados**  
**© 2016, Arturo Ruiz Luna y**  
**Francisco Javier García De León**  
**(Editores)**

**ISBN: 978-607-7900-26-9**

Impreso en México  
Printed in Mexico

La presentación y disposición en conjunto de LA TRUCHA DORADA MEXICANA son propiedad del editor. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema o método, electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información), sin consentimiento por escrito de los titulares correspondientes. Sin embargo, es posible copiar o descargar material para uso exclusivamente personal o educacional y no comercial. No se permite la remoción o alteración de la leyenda de Derechos de Autor o la que manifieste la autoría del material.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD) y al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), las facilidades otorgadas para el desarrollo del proyecto “El paisaje genético, nuevo enfoque multiescala para el estudio de poblaciones de truchas nativas en situación de riesgo en la Sierra Madre Occidental” financiado por CONACYT Ciencia – Básica (CB-2010-01-152893). Este libro forma parte de los resultados de dicho proyecto.

La elaboración de esta obra colectiva es, además del esfuerzo de los autores y de las instituciones que representan, resultado del apoyo de diversas personas que tuvieron la disposición para ayudarnos en el trabajo de campo, ya sea por curiosidad, para transmitirnos un poco de su saber local o lo más importante, por que les interesa preservar su ambiente y recursos naturales.

De manera particular, se agradece la colaboración de los guías locales, Sixto Rodríguez Velázquez, Basilio Rodríguez Vizcarra, Vicente Rodríguez Vizcarra, Adan Leal “El Güero”, David Navar, Jorge Reyes, todos ellos del estado de Durango. De manera particular agradecemos a Ricardo Silva González “El Chalote” y también a Tomás Durán Moreno, Juan Apostol Espinoza Lazos y César E. Rascón Camuñez, del estado de Chihuahua. Asimismo, agradecemos el apoyo del Gobierno Municipal de Guanacevi, a través del Secretario del Ayuntamiento Luis Roberto Olivas Villaneva, así como a Javier Cruz Nieto de PRONATURA.

De igual manera extendemos nuestro reconocimiento al grupo binacional “Truchas Mexicanas”, impulsores de la investigación sobre truchas nativas mexicanas. Adicionalmente agradecemos a Brad Shepard, Carter Kruse, Jason Dunham y varios más, que hicieron posible la donación de un equipo de electropesca, básico para los muestreos más recientes.

Finalmente se agradece la valiosa colaboración de la M. en C. Nora Alicia Trelles Rios en la edición de textos, figuras y composición de formato de la presente obra.



## LISTADO DE AUTORES

- Abadía-Cardoso, Alicia      Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. Carr. Tijuana - Ensenada 3917, Col. Fraccionamiento Playitas. Ensenada, Baja California. 22860. México. *aabadia@uabc.edu.mx*
- Aguilar Zárate, Gabriela      Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad Mazatlán, Av. Sábalo-Cerritos s/n. Mazatlán, Sinaloa, 82100. México. *gaguilar@ciad.mx*
- Arredondo-Figueroa, José Luis      Centro de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Aguascalientes. km 3, Carr. Jesús María-La Posta, Municipio de Jesús María. 20900. Aguascalientes, México. *arredondo60@hotmail.com*
- Barriga Sosa, Irene de los Ángeles      Departamento de Hidrobiología. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Av. San Rafael Atlixco- 186. Col. Vicentina. Del. Iztapalapa, CDMX. 09340. México. *ibs@xanum.uam.mx*
- Betancourt Lozano, Miguel      Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad Mazatlán, Av. Sábalo-Cerritos s/n. Mazatlán, Sinaloa, 82100. México. *mbl@ciad.mx*
- Camarena Rosales, Faustino      Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. Carr. Tijuana - Ensenada 3917, Col. Fraccionamiento Playitas. Ensenada, Baja California. 22860. México. *camarena@uabc.edu.mx*
- Cassio Madrazo, Erika      Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango. Sigma 119. Fracc. 20 de Noviembre II, Durango, Dgo. 34220. México. *erikassio@gmail.com*
- Damas Aguilar, José Luis      Dirección General Adjunta de Investigación en Acuicultura, Instituto Nacional de Pesca. Pitágoras 1320. Col. Sta. Cruz Atoyac. Del. Benito Juárez. CDMX. 03310. México,
- De los Santos Camarillo,      Laboratorio de Genética para la Conservación, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Instituto

Anna Belia	Politécnico Nacional, 195, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, BCS. 23096 México.
Dillman, Casey B.	Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA, USA.
Escalante, Marco Alejandro	CEFE UMR 5175, CNRS – Université de Montpellier – Université Paul-Valéry Montpellier –EPHE. Laboratoire Biogéographie et écologie des vertébrés, 1919 route de Mende, 34293 Montpellier Cedex 5, France. <i>marko.escalante@gmail.com</i>
Espinosa Pérez, Héctor	Colección Nacional de Peces. Instituto de Biología, UNAM. Ciudad Universitaria, 3er Circuito Exterior s/n. Coyoacán, CDMX. 04510. México. <i>hector@unam.mx</i>
Falcón Rodríguez, José Luis	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Instituto Politécnico Nacional 195. Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, Baja California Sur. 23096. México
García-De León, Francisco Javier	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Instituto Politécnico Nacional 195. Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, Baja California Sur. 23096. México. <i>fgarciadl@cibnor.mx</i> .
Garza, John Carlos	Fisheries Ecology Division, Southwest Fisheries Science Center. National Marine Fisheries Service. Santa Cruz, CA; Institute of Marine Sciences, University of California, Santa Cruz, California, EUA.
George, Ana	Tennessee Aquarium Conservation Institute, Chattanooga, TN, USA.
Getino Mamet, Leandro Nicolás	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Instituto Politécnico Nacional 195. Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, BCS. 23096. México. Centro para el Estudio de Sistemas Marinos (CESIMAR – CONICET), Blvd. Brown 2915, U9120ACD, Puerto Madryn, Chubut, Argentina.
González Acosta, Adrián	Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas.

Felipe	Instituto Politécnico Nacional. El Conchalito. La Paz, BCS. 23096. México. <i>aacosta@ipn.mx</i>
Hernández Guzmán, Rafael	Catedrático CONACYT - Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. San Juanito Itzicuaró s/n. Col. Nueva Esperanza, Morelia, Michoacán. 58330. México. <i>rhernandez.g@gmail.com</i>
Hernández Ramírez, César Israel	Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango. Sigma 119. Fracc. 20 de Noviembre II, Durango, Dgo. 34220. México.
Ingle de la Mora, Genoveva	Dirección General Adjunta de Investigación en Acuicultura, Instituto Nacional de Pesca. Pitágoras 1320. Col. Sta. Cruz Atoyac. Del. Benito Juárez. CDMX. 03310. México. <i>genovevaingle@yahoo.com.mx</i>
Lambarri Martínez, Christian	Colección Nacional de Peces. Instituto de Biología, UNAM. Ciudad Universitaria, 3er Circuito Exterior s/n. Coyoacán, CDMX. 04510. México.
Márquez, Federico	Instituto de Biología de Organismos Marinos. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Boulevard Brown 2915 (U9120ACD), Puerto Madryn, Argentina. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB), Boulevard Brown 3100, Puerto Madryn, Argentina.
Martínez Castro, Armando	Colección Nacional de Peces. Instituto de Biología, UNAM. Ciudad Universitaria, 3er Circuito Exterior s/n. Coyoacán, CDMX. 04510. México.
Medina Herrera, Elizabeth	Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango. Sigma 119. Fracc. 20 de Noviembre II, Durango, Dgo. 34220. México.
Moreno Sánchez, Juan Francisco	Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo

- Integral Regional Unidad Durango. Sigma 119. Fracc. 20 de Noviembre II, Durango, Dgo. 34220. México.
- Penaluna, Brooke E. Pacific Northwest Research Station. US Forest Service. 3200 SW Jefferson Way, Corvallis, OR, 97331. USA. *bepenaluna@fs.fed.us*
- Ramírez Huerta, Alejandro Luis Programa de Posgrado. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad Mazatlán, Av. Sábalo-Cerritos s/n. Mazatlán, Sinaloa, 82100. México.
- Reyes Valdez, Claudia Alejandra Bioforestal del Noroeste. Calle del Puerto 361. Col. Playa Ensenada, Ensenada, Baja California, 22880, México. *alechrysogaster@hotmail.com*
- Rodríguez Jaramillo, Carmen Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Instituto Politécnico Nacional 195. Col. Playa Palo de Santa Rita. La Paz, Baja California Sur. 23096 México.
- Ruiz Campos, Gorgonio Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. Carr. Tijuana - Ensenada 3917, Col. Fraccionamiento Playitas. Ensenada, Baja California. 22860. México. *gruiz@uabc.edu.mx*
- Ruiz Luna, Arturo Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad Mazatlán, Av. Sábalo-Cerritos s/n. Mazatlán, Sinaloa, 82100. México. *arluna@ciad.mx*
- Sánchez González, Sergio Escuela de Biología. Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Sánchez Ortiz, Eduardo Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango. Sigma 119. Fracc. 20 de Noviembre II, Durango, Dgo. 34220. México.

## PROLOGO

Fue un gran placer recibir la invitación para escribir este prologo. Me dio no solo la oportunidad de leer los estudios más recientes sobre las truchas Mexicanas, sino también la oportunidad para reflexionar sobre las truchas, su conservación, la naturaleza y biodiversidad, amistades, ciencia, relaciones internacionales, y el futuro. En el proceso, me sorprendió algo darme cuenta de la gran importancia que las truchas han tenido a lo largo de toda mi vida y su importancia mundial. Lo que sigue es entonces, mi historia personal con las truchas en lugares visitados con amigos muy especiales con quienes he convivido durante muchos años. Compartimos no solo experiencias memorables, sino también carreras y metas muy parecidas y ahora, este libro escrito y publicado por un grupo muy dedicado a todo lo que a mí me importa, con intención de divulgar al mundo la importancia de una de las más bellas especies de truchas, hasta ahora muy poco conocida.

Nací en el desierto Sonorense en Arizona, donde como niño pasé los veranos pescando trucha arco iris en las sierras del estado. Dedicaba mucho tiempo a la pesca con mosca y aprendí por experiencia y curiosidad, mucho sobre los invertebrados acuáticos y de la ecología acuática. Así que al matricularme al programa de licenciatura en Arizona State University, fue obvio declararme un estudiante de biología. Pero me fue difícil al principio dedicar tanto tiempo a los cursos básicos y tareas del laboratorio y a menudo escapé de mis clases huyendo a las montañas a explorar y pescar. Era mi pasión y en un *spring break* esa pasión me llevó junto con un amigo, a lo que fue mi primera visita a México, no a sus playas, sino a cruzar en mi vieja camioneta a la Sierra San Pedro Mártir, en el norte de Baja California. Una noche cenamos trucha arcoiris, pescada con lombrices de un arroyito entre los pinos. Pasaron muchos años antes de darme cuenta de que no fue trucha arcoiris común, como la que se cultiva y siembra como especie introducida por todo el mundo, sino era una trucha muy especial, endémica de esa sierra. Eso aprendí luego en un curso de pesquerías o de ictiología, que me introdujo también a la increíble diversidad de los peces del mundo, al conocimiento de los peces nativos del desierto y la gran problemática de su conservación, y mi pasión y *hobby* entonces empezaron poco a poco a convertirse en mi profesión.

A raíz de haber tomado esas clases clave, me despertó la conciencia para reconocer la importancia de la parte académica formal en mi futuro. Ya más dedicado y con algo de suerte, conseguí un trabajo de verano con el Servicio Forestal de los EUA. Con mi nuevo jefe y mentor del Servicio Forestal y dos mulas para llevar equipo de acampar, un equipo de electropesca, y una hielera llena de hielo seco, fuimos a hacer ciencia de campo. La meta era tomar muestras de una especie de trucha nativa y endémica (*O. gilae*) para estudios genéticos de su hibridización con una especie invasora – la introducida trucha arcoiris. Un tema aún prevalente en casi todas las actividades sobre conservación de truchas nativas y mencionado en varios capítulos de este libro.

Luego, pasé un par de años en Colombia trabajando en el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INDERENA), investigando las pesquerías del río Magdalena, radicado en un pueblito en una tierra súper caliente y húmeda. Para escapar del calor, a menudo visitaba a un amigo, experto en truchas, trabajando en una estación de cultivo de trucha arcoiris en Lago de Tota, a 3000 msnm en los Andes. Ahí vivía el pez graso (*Rhizosomichthys totae*), antes común, pero hoy seguramente extinto o casi extinto, debido en parte por lo menos, a la introducción de trucha arcoiris. Intentamos muchas veces atrapar

especímenes en las profundidades del lago, sin éxito. Esta historia me hace reflexionar sobre la magnitud del impacto adverso que tiene la trucha arcoiris, la cual se repite muchas veces en muchas partes de este planeta.

Luego, en mi curso de Maestría en Hidrobiología Aplicada en la Universidad de Londres, me impresionó la intensidad de manejo de recursos naturales en Gran Bretaña, allí conocí a una de las muchas estaciones de trucha arcoiris introducida en ese país. El curso destacó sus impactos, no tanto de la especie en sí misma, sino de los desechos que puedan afectar la calidad de agua para consumo humano, etc.

Regresando a casa, fui a visitar a mi profesor de licenciatura, el Dr. Minckley, quien inmediatamente me ofreció un trabajo. Implicó pasar mucho tiempo explorando toda la cuenca del río Yaquí colectando peces para un inventario de su estado de conservación. Ni pensé averiguar el salario antes de aceptar ese verdadero sueño de repente vuelto realidad. Entonces fue en el verano de 1978 que colecté mis primeros especímenes de ambas especies de truchas nativas de esa cuenca y un espécimen de trucha arcoiris introducida. Además, vi en la sierra de Chihuahua varias instalaciones de cultivos rústicos de trucha arcoiris, claramente con alta tasa de escape. Vi también los fuertes impactos de las prácticas forestales y de agricultura en las cuencas de tributarios del altiplano de Chihuahua y me enamoré de las grandes áreas remotas y las bellezas de la Sierra Madre Occidental (SMO), sus culturas y su gente tan amable y diversa.

Luego, con un trabajo en el Departamento de Caza y Pesca de Arizona y encargado de programas de peces nativos, desarrollé programas binacionales para la conservación de especies compartidas con el estado de Sonora. Aunque no estudiamos truchas en ese entonces, empezaron con este trabajo varias colaboraciones y amistades con biólogos mexicanos y de esas amistades eventualmente evolucionó el grupo binacional llamado Truchas mexicanas, citado en muchos capítulos de este libro, por la colección de muchas de las muestras iniciales usadas en algunos estudios expuestos en este libro.

La historia de cada quién dentro del grupo Truchas mexicanas es parecida a la mía. Conocemos toda la problemática de la conservación y la importancia de la biodiversidad. Ahora, por medio de nuestros esfuerzos, sabemos que México es dueño de gran parte de la diversidad global de este grupo económicamente importante, las truchas, y que esa diversidad importante para la economía global ahora se encuentra en grave peligro de extinción. Así aumenta nuestra pasión, que desde el principio ha sido siempre fuerte, tanto que la mayoría de nuestras salidas a la SMO fueron apoyadas, sobre todo, por nuestros propios bolsillos. Tomamos vacaciones de nuestros empleos para perseguir el *hobby* que compartimos –la exploración y descubrimiento científico. Desafortunadamente, siendo un grupo de científicos con una economía que depende de los trabajos profesionales y trabajando en sistemas diferentes en distintos países, en muy diferentes ambientes y perspectivas, la pasión mezclada con las diferencias a veces, generaron conflictos. Pero lo que siempre nos motivó y nos unió, fue la conservación de la diversidad biológica y sabemos que eso a fin de cuentas, depende de la humanidad. En este caso, específicamente de las poblaciones humanas de la SMO. Para ellos, aquí tenemos por primera vez en este libro, un resumen del conocimiento científico en español, escrito por la comunidad científica mexicana, que es, por fin mucho más accesible para la comunidad en general que lo que ha sido la literatura científica, ya casi todo en inglés y publicado en revistas inaccesibles. Este libro, entonces, servirá de fuente de la información básica que requieren no solo los que viven en las cuencas de los ríos con truchas nativas, sino también para los empleados de unidades de los gobiernos quienes requieren este conocimiento para asuntos

legales y logísticos que apoyan acciones locales. También es útil para los escritores de revistas populares, quienes ahora pueden difundir más efectivamente la ciencia a los que viven en la bella e importante SMO. Así, felicito a todos los autores de los capítulos de este libro y a los editores, por sus diversas contribuciones al conocimiento de la zona y una parte de la importante diversidad de truchas endémicas de México, así como por su pasión y dedicación a la conservación. Anticipo por medio de la publicación de este libro una acción acelerada para seguir avanzando en el conocimiento de esa riqueza biológica y más atención por parte de los diferentes niveles de gobiernos para su conservación en beneficio a largo plazo de la gente de la región y del país a quien pertenecen esas truchas únicas.

**Dean A. Hendrickson**  
**Curator of Ichthyology**  
**University of Texas Austin**  
**Department of Integrative Biology**  
**Biodiversity Collections**



# CONTENIDO

## Capítulo 1

1

### **La trucha dorada mexicana: estado actual, oportunidades de estudio y retos para el manejo y conservación de una especie endémica en riesgo**

---

*Arturo Ruiz-Luna, Francisco Javier García-De León*

## Capítulo 2

13

### **Caracterización paisajística e hidrológica de la Sierra Madre Occidental utilizando técnicas de Percepción Remota, Modelos Digitales de Elevación y Sistemas de Información Geográfica**

---

*Rafael Hernández-Guzmán, Arturo Ruiz-Luna*

## Capítulo 3

29

### **Historia evolutiva y biodiversidad genética de las truchas de la Sierra Madre Occidental**

---

*Alicia Abadía-Cardoso, Francisco Javier García-De León, John Carlos Garza*

## Capítulo 4

39

### **Análisis del contenido estomacal de la trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* (Needham y Gard 1964) en los ríos Fuerte, Culiacán y Sinaloa, México**

---

*Arturo Ruiz Luna, Francisco Javier García de León*

Capítulo 5

53

**Dimorfismo sexual y periodo reproductivo de la trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster* en los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán**

---

*Francisco Javier García-De León, Leandro Nicolás Getino Mamet, María del Carmen Rodríguez Jaramillo, Sergio Sánchez González, Federico Márquez, Arturo Ruíz Luna*

Capítulo 6

73

**Relaciones biométricas y aspectos poblacionales de la trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* en las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, México**

---

*Arturo Ruíz Luna*

Capítulo 7

87

**Relaciones biométricas comparativas de peso y longitud y longitud-longitud entre la trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*) y otras truchas nativas del noroeste de México**

*Gorgonio Ruiz-Campos, Claudia Alejandra Reyes-Valdez, Faustino Camarena-Rosales, Adrián Felipe González-Acosta*

Capítulo 8

97

**Predicción de la distribución geográfica de trucha dorada *Oncorhynchus chrysogaster* (Needham y Gard 1964) en los ríos Sinaloa y Culiacán, México**

---

*Arturo Ruíz-Luna, Rafael Hernández-Guzmán, Francisco Javier García-De León, Alejandro L. Ramírez-Huerta*

Capítulo 9

115

**Presencia de Compuestos Organoclorados Persistentes (COPs) en poblaciones de trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*), especie endémica de la Sierra Madre Occidental**

---

*Gabriela Aguilar Zárate, Arturo Ruiz-Luna, Miguel Betancourt Lozano*

Capítulo 10

125

**Introgresión genética de la trucha arcoíris exótica en poblaciones de trucha dorada mexicana**

---

*Marco Alejandro Escalante, Francisco Javier García-De León, Casey B. Dillman, Anna Belia De los Santos Camarillo, Ana George, Irene de los Angeles Barriga Sosa*

Capítulo 11

137

**Estrategias acuícolas para la conservación de trucha nativa: primeras experiencias**

---

*Irene de los Angeles Barriga Sosa, José Luis Arredondo-Figueroa, Genoveva Ingle de la Mora, Francisco Javier García-De León*

Capítulo 12

153

**Primeras gestiones para el cultivo de trucha nativa de la Sierra Madre Occidental: recolecta, determinación de identidad genética y reproducción**

---

*Alicia Abadía-Cardoso, José Luis Damas-Aguilar, José Luis Falcón-Rodríguez, Francisco Javier García-De León, John Carlos Garza, Genoveva Ingle de la Mora*

Capítulo 13

173

**La truticultura en México y sus implicaciones para las truchas nativas**

---

*Héctor Espinosa Pérez, Christian Lambarri Martínez, Armando Martínez Castro*

Capítulo 14

183

**Conservación de truchas del Pacífico**

---

*Brooke E. Penaluna*

Capítulo 15

189

**Caracterización Socioeconómica de la Actividad Truchícola  
en el estado de Durango: Un acercamiento para dimensionar  
su importancia**

---

*Erika Cassio Madrazo, Elizabeth Medina Herrera, Eduardo Sánchez Ortiz, César  
Israel Hernández Ramírez, Juan Francisco Moreno Sánchez*

Capítulo 16

203

**La política pública mexicana de truchicultura**

---

*Eduardo Sánchez Ortiz, Erika Cassio Madrazo, Elizabeth Medina Herrera*

# 11. Estrategias acuícolas para la conservación de trucha nativa: primeras experiencias

---

*Irene de los Ángeles Barriga-Sosa, José Luis Arredondo-Figueroa, Genoveva Ingle de la Mora, Francisco Javier García-De León*

## INTRODUCCIÓN

Desde hace un siglo el salmónido más cultivado en nuestro país es la trucha arcoíris *Oncorhynchus mykiss*. Esta especie fue introducida en el año de 1883, procedente del sur de los EUA (Arredondo-Figueroa 1983). Existen reportes de la introducción de otras especies de salmónidos como la trucha de arroyo *Salvelinus fontinalis* y la trucha café *Salmo trutta*, sin embargo, la trucha arcoíris seleccionada es la única con alta rentabilidad, generando una producción estimada de 3,500 toneladas anuales, en cerca de 1,000 granjas comerciales, siendo los estados de Estado de México, Michoacán, Puebla, Hidalgo, Chihuahua y Veracruz los que cuentan con una mayor cantidad de granjas comerciales (Carta Nacional Pesquera 2012).

Recientemente, se han realizado diversos estudios que demuestran la existencia de por lo menos seis entidades genéticas de salmónidos nativos, localizados en la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California y en la Sierra Madre Occidental en los estados de Baja California, Chihuahua, Sonora, Sinaloa y Durango. Entre estas especies de trucha nativa se encuentra una subespecie, *Oncorhynchus mykiss nelsoni*, que habita en la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California; la especie conocida como trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster*, en la Sierra Madre Occidental entre los límites de Durango y Chihuahua y al menos otras cuatro entidades genéticas todavía no identificadas del género *Oncorhynchus* al norte y al sur de la distribución de *O. chrysogaster* (Nielsen y Sage 2001; Hendrickson et al. 2002; Ruiz-Campos et al. 2003; Hendrickson et al. 2006; Espinosa et al. 2007; Abadía-Cardoso et al. 2015). Esta condición privilegia a nuestro país al poseer una gran diversidad de salmónidos, con especies únicas en el mundo. Este amplio recurso genético se encuentra vulnerable, debido a distintas circunstancias que incluyen entre otras la deforestación creciente de los bosques de coníferas, el cambio de hábitat, el cambio climático y la sobreexplotación del recurso. Así mismo, la introducción y cultivo de *O. mykiss* ha ocasionado la introgresión génica de las especies nativas con ésta última (Escalante et al. 2014; Abadía-Cardoso et al. 2015).

Los diferentes salmónidos que forman este conglomerado de especies o subespecies, viven en condiciones adversas como la alta variabilidad en los flujos de agua de los arroyos y ríos, debido a la deforestación, limitación de espacio, competencia interespecífica, fluctuaciones de las condiciones climáticas, pesca furtiva y descontrolada y disminución de las poblaciones (Hendrickson et al. 2002). En muchos de los casos las truchas nativas no alcanzan grandes tallas y su fecundidad y reproducción es limitada por la falta de espacio y alimento, a tal grado que no crecen adecuadamente y se presentan organismos de tallas pequeñas con ovarios desarrollados durante el invierno, dando la impresión que esa es la talla máxima que alcanzan dichas truchas y que por lo tanto su potencial en la acuicultura está limitado por su talla y peso; esto mismo ocurre en muchas truchas residentes en los Estados Unidos (Wilson 1997).

Debido al interés creciente para la conservación y uso sustentable de estos salmónidos nativos, el objetivo de este trabajo consistió en la captura de organismos silvestres de trucha nativa no identificada y su posterior aclimatación a los sistemas de cultivo en canales de corriente rápida, para estudiar su posible adaptación a las condiciones de cultivo y al alimento balanceado, así como para determinar su tasa de crecimiento y obtener su reproducción controlada.

## MÉTODOS

Se realizaron dos recolectas de trucha nativa en la parte alta de los ríos Sinaloa (arroyo Casa Quemada, Municipio de Guadalupe y Calvo, Chihuahua) y Culiacán (arroyo Cerro Solo, Municipio de Guadalupe y Calvo, Chihuahua), una en octubre del 2006 y otra en diciembre del 2007, respectivamente. Los organismos fueron capturados con anzuelo y colocados en una jaula ubicada en la parte profunda del río. Posteriormente, los organismos fueron colocados en bolsas de plástico con oxígeno y transportados al Centro Trutícola de Guachochi (perteneciente a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, SAGARPA), Chihuahua. Las truchas fueron colocadas en canales de corriente rápida y mantenidas en cuarentena. La identidad del lote se determinó a partir del marcador *r16S* y la diversidad genética del gen citocromo b y la región control mitocondrial así como con 12 loci microsatélites.

### *Identidad y diversidad genética del stock*

Se obtuvieron secuencias de regiones mitocondriales de los genes *r16S* para determinar la identidad genética del stock fundador en relación a otros miembros del género *Oncorhynchus*; y se utilizaron secuencias de un fragmento del citocromo b (*cit b*) y de la región control mitocondrial (RC dominio derecho) así como 12 loci microsatélites para determinar la diversidad genética del lote.

La extracción de ADN total (ADNt) se realizó a partir del tejido de aleta de los reproductores y de acuerdo a los procedimientos empleados con los estuches comerciales de extracción Dneasy™ Tissue Kit, QUIAGEN®, USA.

Las amplificaciones vía PCR de la región mitocondrial *r16S* se realizaron de acuerdo a Barriga-Sosa et al. (2005), mientras que para las regiones *cit b* y RC se siguieron los procedimientos referidos en Tabla 1.

Tabla 1. Indica la región mitocondrial amplificada y las condiciones de amplificación.

Región	Ciclos térmicos		
r16S	30 ciclos	} 94 °C - 45 segundos 50.5 °C - 45 segundos 72 °C - 1:30 minutos	
			} 94 °C - 45 segundos 50 °C - 45 segundos 72 °C - 1:30 minutos
RC	30 ciclos	} 94 °C - 45 segundos 53 °C - 45 segundos 72 °C - 1:30 minutos	

Los iniciadores utilizados para amplificar cada una de las regiones fueron: SAR L2150 y SBR H3080 (Palumbi et al. 1991); H15915 y L14724 para *r16S* (Kocher et al. (1989) y *cit*

*b*, respectivamente. Para amplificar la región control (RC) se diseñaron iniciadores a partir de secuencias de Zardoya et al. (1995) (GENBANK NC 001717). Los iniciadores son: DL04F 5'-CAA CTT TCA GCA TCA GTC CGG CTT-3' y DL03R 5'-GAA AGT GTA CGC ATT ACA GCG-3'.

Para la amplificación de los 12 loci microsatélites, se utilizaron los pares de iniciadores utilizados por De Los Santos Camarillo (2008), los cuales han sido utilizados previamente por Nielsen (1996, 1999) y Nielsen et al. (1999).

La electroforesis tanto de las tres regiones mitocondriales como de los 12 loci microsatélites se llevaron a cabo en un secuenciador automático ABI Prism Modelo 3100 Avant del Laboratorio Divisional de Biología Molecular de la División de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Las tallas alélicas de cada uno de los 12 loci microsatélites se trabajaron siguiendo los métodos descritos en De Los Santos (2008).

#### *Análisis de datos genéticos*

Las secuencias compiladas de las regiones mitocondriales fueron alineadas utilizando ClustalW, implementado en *Bioedit Sequence Alignment Editor* (Hall 1999) y ajustadas a ojo. Se realizó un análisis de comparación por homología con secuencias de GenBank (*National Center for Biotechnology Information*) vía BLASTN (Altschul et al. 1997). Las secuencias resultantes fueron comparadas con secuencias de regiones homólogas obtenidas de especímenes de *Oncorhynchus chrysogaster* colectadas en las cuencas de Fuerte y Sinaloa en 2007 por miembros del grupo binacional Truchas Mexicanas así como con secuencias de otros salmónidos del género (ei., *O. clarkii henshawi*, *O. kisutch*, *O. keta*, *O. gorbuscha*, *O. nerka*, *O. mykiss* Washington y Idaho). Las secuencias parciales del gen *cit b* fueron traducidas utilizando el código genético mitocondrial de mamíferos implementado en DnaSP versión 2.0 (Rozas y Rozas 1999).

Las secuencias de la región *r16S* se analizaron para la búsqueda del mejor modelo evolutivo, implementado en MEGA 7 y se sometieron a un análisis del vecino más cercano (NJ) con búsqueda heurística y 10000 réplicas de *bootstrap*, utilizando el modelo evolutivo de K2+G (G = 0.05, AICc = 1738.75, lnL = -846.28), resuelto como el modelo de mejor ajuste. Las distancias genéticas se estimaron utilizando el mismo modelo evolutivo.

El análisis de diversidad genética con las secuencias de la RC se determinó a partir de los siguientes estimadores, número de haplotipos (*NH*), sitios segregados (*S*), diversidad haplotípica y nucleotídica (*h* y  $\pi$ , Nei 1987), todos ellos implementados en DnaSP versión 3.14 (Rozas y Rozas 1999).

Por su parte la diversidad de los 12 loci microsatélites se obtuvo a partir de las frecuencias alélicas utilizando GenePop (versión web, Raymond y Rousset, 1995), determinando el número de alelos por locus, las heterocigosidades observada y esperada ( $H_o$  y  $H_E$ ) después de la corrección de Levene.

#### *Desempeño de la población fundadora*

Después de la cuarentena, los organismos que lograron sobrevivir fueron mantenidos durante catorce meses. Se realizaron tres medidas biométricas, una al momento de la captura y transportación al Centro, otra en octubre de 2007 (un año después) y una final en diciembre del 2007. En los tres exámenes biométricos se registró el peso total (Pt) en gramos y la longitud total (Lt) en centímetros, utilizando una balanza digital Ohaus (0.1 g de precisión) y un ictiómetro graduado en cm (1 mm de precisión). El último análisis

biométrico coincidió con la época de reproducción, y el 19 de diciembre del 2007 se obtuvieron los primeros desoves que se continuaron hasta enero del 2009.

#### *Generación F1*

Un total de 492 crías de la F1, con un peso medio de 0.9 g de Pt y 4.1 cm of Lt, fueron seguidas para determinar su desempeño en crecimiento durante un año. En marzo del 2009, estas truchas nativas fueron introducidas en estanques y mantenidas ahí durante los primeros tres meses, para posteriormente ser trasladadas a canaletas por dos meses y finalmente a una canaleta hasta que alcanzaron más de 500 g. Los Pt y Lt fueron registrados mensualmente. Las truchas fueron alimentadas con la formula de Steelhead de diferentes tamaños y de acuerdo al tamaño de las crías. Los parámetros de calidad del agua tanto para los fundadores como para la F1 se mantuvieron como sigue: oxígeno disuelto  $5.4 \pm 1.4$  mg L<sup>-1</sup>; temperatura del agua  $13.2 \pm 2.4$  °C; alcalinidad total  $6.3 \pm 1.2$  mg L<sup>-1</sup>; pH  $8.0 \pm 1.2$ ; TAN  $1.0 \pm 0.4$  mg L<sup>-1</sup>; nitritos  $0.002 \pm 0.003$  mg L<sup>-1</sup> y nitratos  $1.7 \pm 0.5$  mg L<sup>-1</sup>.

#### *Análisis de datos*

Los datos de fundadores y F1 se vaciaron en una hoja Excel y se calcularon y graficaron los estadísticos generales para peso total y longitud total durante el periodo de cultivo, así como la relación longitud-peso y sus parámetros. Para los datos de la F1 registrados se calcularon los siguientes indicadores de desempeño en el crecimiento: días de cultivo, número inicial y final de organismos, porcentaje de sobrevivencia (%), peso total inicial (Pti, g); peso total final (Ptf, g), ganancia total en peso (g), crecimiento diario en peso Pt (g día<sup>-1</sup>), longitud inicial total (Lit, cm), longitud total final (Ltf, cm), ganancia en longitud total (cm), crecimiento diario en Lt (cm día<sup>-1</sup>), tasa específica de crecimiento (Tec, % día<sup>-1</sup>) (Thiessen et al. 2003; Aksnes et al. 2006), tasa de incremento relativo (TIR, %) de acuerdo a Ricker (1975), tasa de conversión alimenticia (TCA) (Thiessen et al. 2003) y factor de condición (FC) (Aksnes et al. 2006).

## **RESULTADOS**

#### *Identidad y diversidad genética del stock.*

Las secuencias compiladas (562 bp) de una región del gen *r16S* mitocondrial de 27 especímenes resolvieron tres haplotipos, H1 (el cual compartieron cuatro organismos); el H2 (compartido por 14 organismos); H3 (compartido por nueve organismos) los cuales fueron homólogos a la misma región de *Oncorhynchus chrysogaster* de las cuencas de los ríos Fuerte y Sinaloa, y mostraron las distancias genéticas más bajas (0.000-0.004). De acuerdo a la estrecha relación de los haplotipos resueltos y a que en la topología los haplotipos de la trucha nativa forman un mismo grupo con la secuencia homóloga de *O. mykiss* de Idaho (0.002-0.005) fuertemente soportado, hace suponer que la trucha arcoíris de Idaho tiene, en efecto, una relación muy cercana con *O. chrysogaster* (Fig. 1). El par de especies reportadas como *O. mykiss* de Washington y *O. clarkii henshawi*, tampoco presentaron diferencias en la región analizada (0.00). Por otro lado, las distancias entre las especies de *Oncorhynchus* que conforman el otro clado fueron mayores (0.013-0.030).

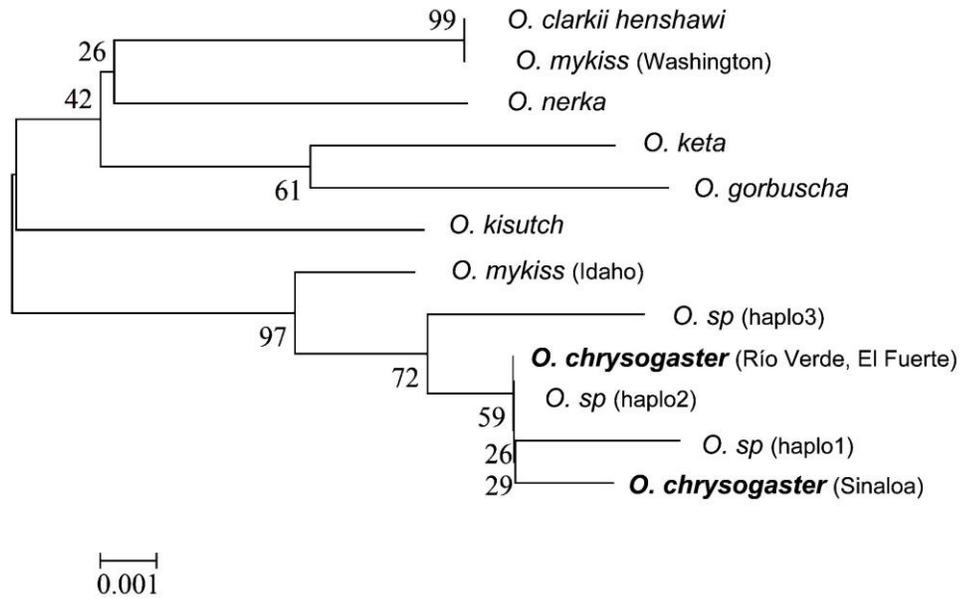


Figura 1. Topología consenso inferida a partir del gen *r16S* mitocondrial y 12 taxa utilizando Neighbor-Joining, 10000 réplicas de bootstrap y la distancia de K2+G.

Los niveles de diversidad encontradas en la trucha identificada como *O. chrysogaster* y mantenidas en cautiverio, con las regiones mitocondriales *cit b* y *RC* se resumen en la Tabla 2. Los niveles de diversidad en cuanto al número de haplotipos encontrados en la región control mitocondrial (RC) son ligeramente mayores a lo reportado por Nielsen et al. (1998) para la trucha de San Pedro Mártir *O. mykiss nelsoni*, y otros organismos de trucha nativa no identificada del río Yaqui, para los cuales, los autores solamente resuelven tres haplotipos.

Tabla 2. Niveles de diversidad haplotípica y nucleotídica encontrados en el lote de trucha dorada del presente estudio. Así como el número de haplotipos (*NH*) y el número de sitios segregados (*S*).

Marcador genético	N	NH	<i>h</i>	$\pi$	S	Fuente
<i>Cit b</i> (379)	13	8	0.808	0.0213	6	Presente trabajo
<i>RC</i> (495)	10	8	0.956	0.0414	41	Presente trabajo
Otros estudios(RC)	43*	3	ND	ND	ND	(Nielsen et al. 1998)

\**O. mykiss nelsoni* y organismos del río Yaqui; ND = no disponible.

Con relación a los 12 loci microsatélites, los niveles de diversidad resueltos en el lote identificado como *O. chrysogaster* y mantenido en cautiverio en el Centro Acuícola Guachochi, se resumen en la Tabla 3 y se encuentran dentro de los reportados para otras truchas mexicanas y otras especies de salmónidos.

Tabla 3. Diversidad del lote de trucha dorada mexicana, mantenido en cautiverio con 12 loci microsatélite. Se contrasta con niveles de heterocigosidad ( $H_E$ ) en otras especies de salmónidos.

Locus	NA	$H_E$	Otras especies y poblaciones	$H_E$	Referencia
OMY-27	6	47.4	<i>Salmo trutta</i> (cultivo, Finlandia)	37.6 - 71.4	Aho et al. 2006
ONEU-8	8	45.6	<i>Salmo salar</i> (silvestre, EUA)	49.0 - 92.0	Spidle et al. 2004
ONEU-11	4	33.9	<i>Salmo salar</i> (silvestre, España)	72.8 - 82.0	Machado et al. 2007
OMY-325	14	49.0	<i>O. clarki lewisi</i> (silvestre, Canadá)	14.0 - 87.0	Taylor et al. 2003
SSA-85	14	52.5	<i>O. mykiss</i> (silvestre, costa de EUA)	27.0 - 90.0	Nielsen 1999
OMY-77	8	47.3	<i>O. mykiss stonei</i> (McCloud, California, EUA)	68.0	Nielsen et al. 1999
OMY-207	18	52.8	<i>O. mykiss nelsoni</i> (St. Domingo)	33.2	De Los Santos 2008*
OTS-1	16	52.0	<i>O. chrysogaster</i> (Fuerte & Culiacán)	54.3	De Los Santos 2008*
OMY-2	17	51.7	Truchas nativas No-descritas (516)	39.0	De Los Santos 2008*
SFO-8	12	49.3			
SSA-14	16	52.6			
SSA-289	10	45.8			
$H_E =$		48.3			

NA = número de alelos por locus; \* intervalo NA = 3.4 - 20

#### Desempeño de la población fundadora

El peso total (Pt) de los organismos silvestres capturados estuvo entre los 5 a 200 g, con promedio de 15.6 g (Fig. 2). Los organismos más pequeños fueron indiferenciados y los de mayor talla presentaron signos de maduración sexual, ya que liberaron esperma y huevos con una ligera presión abdominal, lo que sugería la proximidad de la época reproductiva. Al introducirse los organismos a las canaletas mostraron signos de estrés por una semana, lo cual era notorio al presentar coloración oscura en las regiones laterales del cuerpo, después de ese tiempo la coloración se restableció y las manchas de la línea lateral fueron notables nuevamente. Durante esa primera semana los organismos perdieron peso y ocasionalmente consumieron insectos y larvas presentes en la canaleta, posteriormente iniciaron la ingesta de alimento Steelhead entre la segunda y tercera semanas. En este periodo la mortalidad alcanzó un 50%.



Figura 2. Fotografía de un ejemplar de trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*) capturada en arroyo Casas Quemadas, cuenca de río Fuerte, Chihuahua.

En la figura 3 se muestra la curva de crecimiento del lote fundador. En un inicio la trucha nativa tenía un Pt promedio de 38.3 g y una Lt de 15.6 cm. En un periodo de dos años, los fundadores alcanzaron un Pt promedio de 1950 g y una Lt de 51.9 cm. Al final del estudio un lote de 17 organismos componía el lote fundador (Tabla 5, Fig. 4).

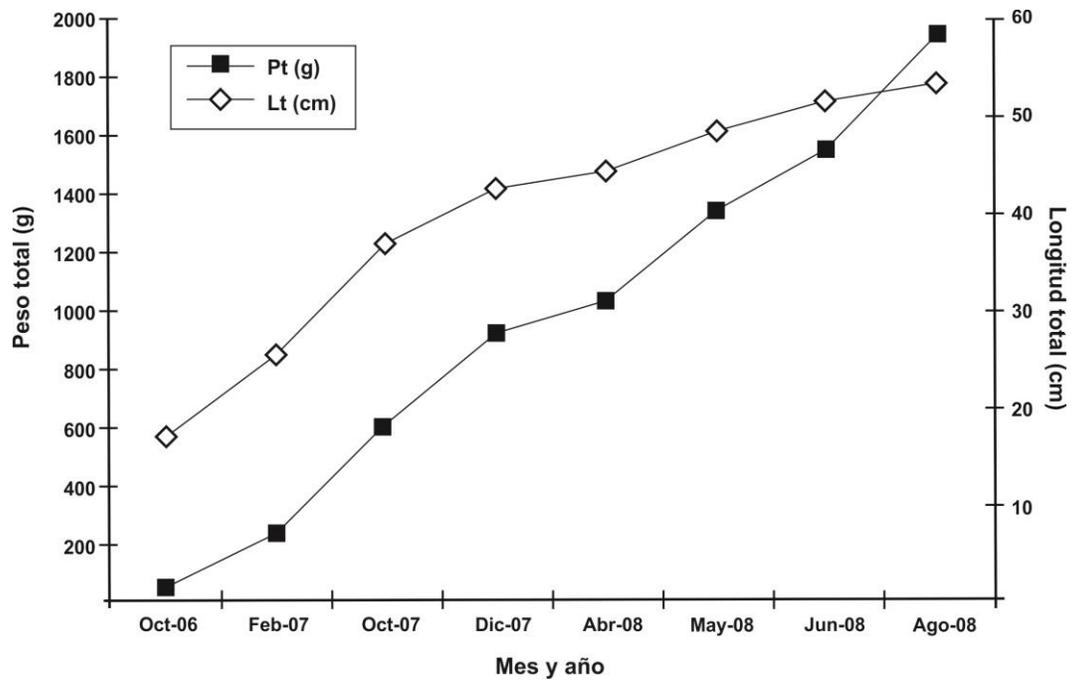


Figura 3. Crecimiento en peso y talla del lote fundador de trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*), de octubre de 2006 a agosto de 2008.

Tabla 4. Estadísticos generales de un lote fundador de 17 organismos de trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*), datos hasta agosto de 2008.

Dato	Peso Total (g)	Longitud Total (cm)	Altura máxima del cuerpo (cm)
Promedio	1,950.0	51.9	14.3
Desviación estándar	421.3	9.2	1.6
Mínimo	850.0	22.0	11.0
Máximo	2,400.0	58.0	16.0



Figura 4. Reproductor de trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* (Needham y Gard 1964).

La correlación longitud-peso resolvió un valor de b de 3.1 sugiriendo un modelo de crecimiento isométrico  $P_t = 0.008L_t^{3.122}$ , con una  $R^2 = 0.9954$  (Fig. 5).

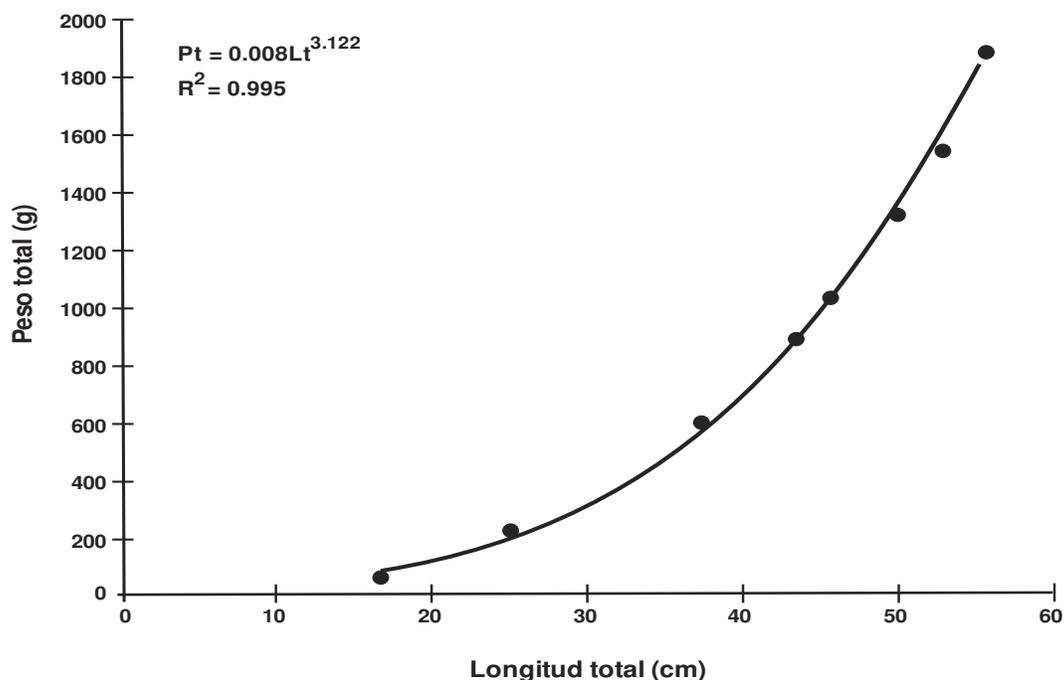


Figura 5. Relación Peso - Longitud de los organismos fundadores de trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*).

#### *Desempeño en el crecimiento de la F1*

La F1 mostró una tendencia de crecimiento ascendente a lo largo del periodo de cultivo. La trucha dorada F1 presentó a los cuatro meses de edad un  $P_t$  promedio de 0.9 g y una  $L_t$  promedio de 4.4 cm. Al final del estudio presentó un  $P_t$  promedio de 570 g y 33.5 cm  $L_t$  promedio (Fig. 6). La correlación longitud-peso resolvió un valor de  $b = 3.1$  sugiriendo como en el lote fundador un modelo de crecimiento isométrico con una ecuación de ajuste  $P_t = 0.014L_t^{2.904}$  (Fig. 7). En la Tabla 5 se muestran los indicadores de crecimiento.

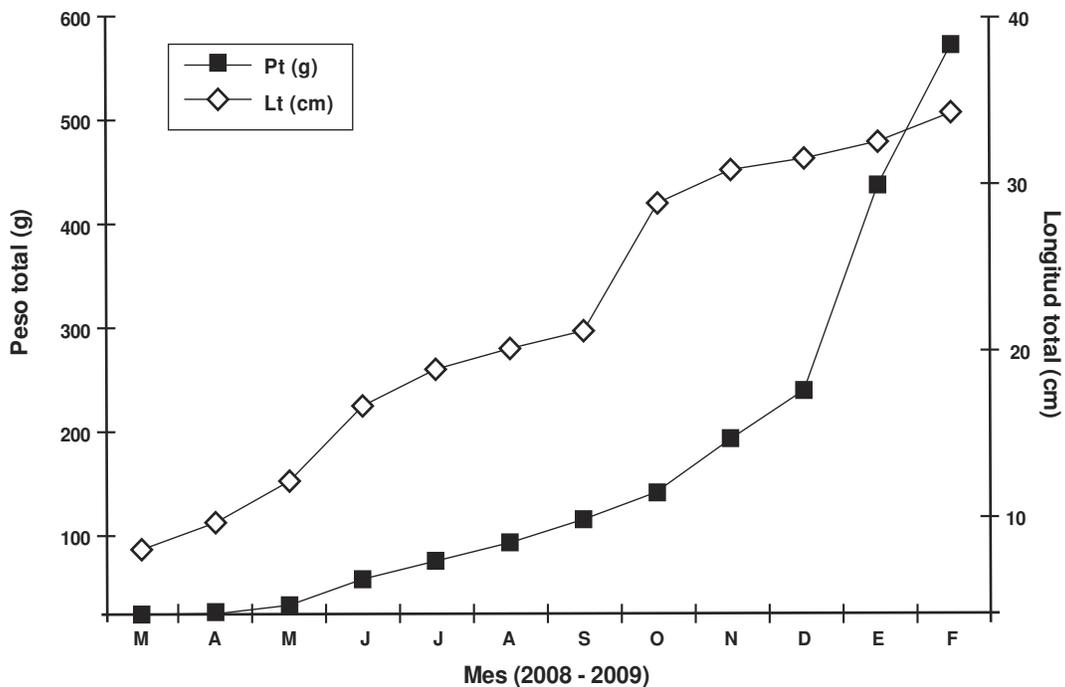


Figura 6. Crecimiento de la F1 de la trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*) durante 12 meses de cultivo.

Tabla 5. Indicadores del desempeño de crecimiento de la trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*), F1.

Indicadores	Valor
Días de cultivo	330
Número inicial de peces	492
Número final de peces	415
Sobrevivencia (%)	80
Peso total inicial (g)	0.9
Peso total final (g)	570
Ganancia en peso total (g)	569.1
Incremento diario de peso total (g día <sup>-1</sup> )	1.72
Longitud inicial total (cm)	4.4
Longitud final total (cm)	33.5
Ganancia en longitud total (cm)	29.1
Incremento diario de longitud total (cm día <sup>-1</sup> )	0.09
Tasa específica de crecimiento (% día <sup>-1</sup> )	1.95
Tasa relativa de crecimiento (%)	63.23
Tasa de conversión alimenticia	1.2
Factor de condición	1.5

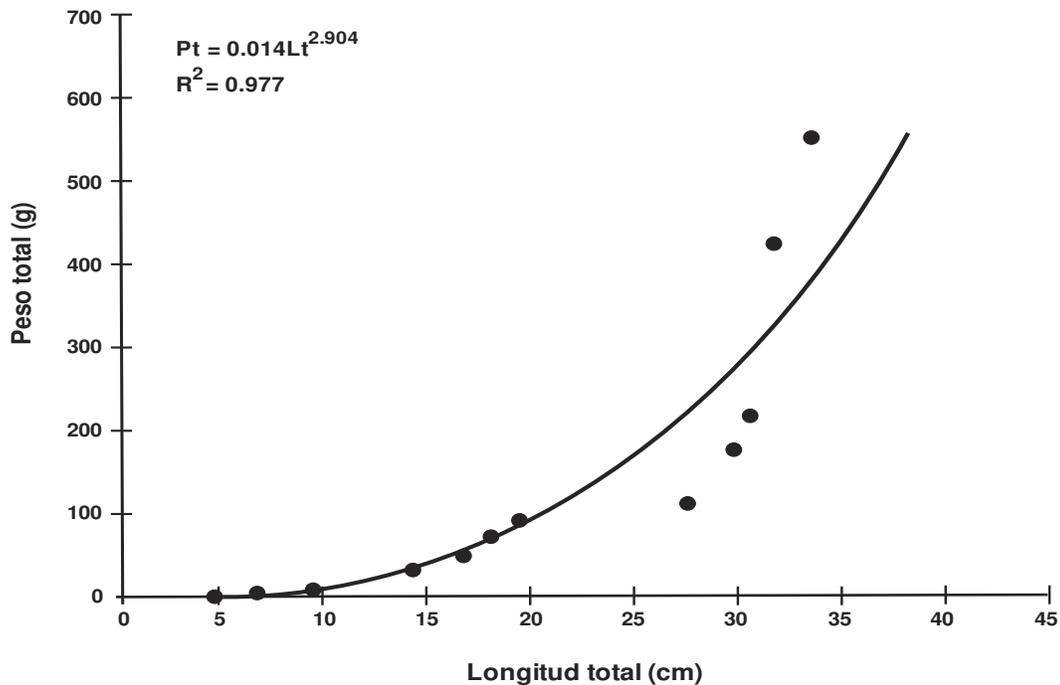


Figura 7. Relación Peso - Longitud- para la F1 de trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*).

## DISCUSIÓN

Aunque existen trabajos en donde se utilizan marcadores moleculares para caracterizar/identificar genéticamente lotes de peces utilizados en programas de repoblamiento, conservación y acuicultura (Nelson et al. 2008; Norris et al. 2000; Pérez-Enriquez et al. 1999; Tan et al. 1999; Thongpan et al. 1997; Heath et al. 1995), este es el primer trabajo que reporta datos sobre el cultivo de trucha dorada mexicana identificada y caracterizada con marcadores mitocondriales y microsátélites y que propone una estrategia metodológica para cultivar especies de truchas nativas para su conservación y posible producción acuícola. Los marcadores utilizados permitieron por un lado, determinar la identidad del lote no identificado y su estrecha relación con otras especies del género (*r16S*). Mientras que los marcadores *cit b*, *RC* y los 12 loci microsátélites diagnosticaron la diversidad del lote dentro de los intervalos reportados para otras especies de salmónidos. La cercanía de la relación de *O. mykiss* y la trucha dorada mexicana ha sido previamente demostrada con varios marcadores bioquímicos y moleculares (Utter y Allendorf 1994; Nielsen, 1996, 1999; Nielsen et al. 1999; Taylor et al. 2003; Spidle et al. 2004; Thrower et al. 2004; Aho et al. 2006; Valiente et al. 2007). Sin embargo, cabe destacar que recientemente Abadia-Cardoso et al. (2015) mencionan que el lote de truchas usado en este estudio para el cultivo en el Centro de Guachochi no corresponde a la trucha dorada mexicana, sino que más bien a *O. mykiss*, encontrándose más cercanamente relacionada a las líneas cultivadas en los Estados Unidos; este estudio se realizó recientemente y usó un mayor número de muestras que incluye la mayor parte de linajes y especies de género *Oncorhynchus*, además de ejemplares provenientes de diferentes centro de cultivo en California, EUA, y marcadores del ADN nuclear (microsátélites y SNPs), lo cual representa una base de datos más completa para los fines de identificación de especies. En nuestro

estudio se empleó el gen *r16S* del ADN mitocondrial para la identificación específica, sin embargo las relaciones filogenéticas entre las especies y linajes dentro del género *Oncorhynchus* usando marcadores del ADN mitocondrial no están bien establecidas (Wilson and Turner 2009; Nielsen et al. 1998) y la base de datos para la comparación genética no incluye los linajes y individuos de cultivo de los Estados Unidos; por otro lado es conocido que la información aportada por los marcadores del ADN nuclear y mitocondrial no siempre coinciden (Nielsen 1996), por lo que queda la incertidumbre sobre la identidad específica del lote de truchas que se usó para las experiencias de cultivo. Lo anterior y la evidencia de introgresión de truchas nativas mexicanas con trucha arcoíris de centros trutícolas cercanos, hace evidente la necesidad de continuar avanzando en el desarrollo y aplicación de marcadores moleculares que permitan delinear de manera más precisa las relaciones de taxa cercanamente relacionados.

Con relación a la diversidad genética del lote, esta se encontró dentro de los intervalos reportados para otras especies de salmónidos e inclusive se resolvieron mayor número de haplotipos a los reportados por Nielsen et al. (1998) para la trucha de San Pedro Mártir *O. mykiss nelsoni* y otros organismos de trucha nativa no identificada del río Yaqui.

Durante años la especie que habita en arroyos de cuencas de la Sierra Madre Occidental fue considerada como un pez pequeño que no crecía más de pocos centímetros. Los resultados presentados aquí, por otro lado, muestran que la especie puede crecer y alcanzar tallas similares a las reportadas para la trucha arcoíris. La trucha arcoíris se ha estudiado durante más de un siglo y su cultivo se ha extendido en muchos países de América, Europa, Asia y Oceanía. El éxito del cultivo de trucha arcoíris se basa en la producción de líneas seleccionadas que mantienen una alta tasa de crecimiento bajo diferentes temperaturas del agua en un intervalo aceptable y son más resistentes a las enfermedades. Estas líneas han mantenido la producción mundial y de acuerdo con Klontz (1991) llegan a la madurez entre los 10 y 24 meses, el peso total de los reproductores varía entre 0.5 y 3 kg a una temperatura de agua de 10 a 15°C, y la producción de huevos oscila entre 1500 y 3000 huevos por kilogramo de hembra. Estas características han servido de referencia estándar para la mayoría de los productores de trucha en México y la producción actual de la trucha se basa en líneas seleccionadas importadas de otros países y continentes, y no hay serios intentos para desarrollar nuevas líneas locales o para estandarizar la tecnología del cultivo de las especies nativas, como el de la trucha dorada mexicana. Sin embargo, en México, la gran diversidad de condiciones geográficas y climáticas requieren de líneas o especies de salmónidos mejor adaptadas. La manera tradicional de cultivar truchas introducidas dió como resultado la importación de enfermedades infecciosas como la Necrosis Pancreática Infecciosa (IPN), la cual ha provocado importantes pérdidas económicas. Las experiencias presentadas en esta investigación en relación con la gestión y la cría de la trucha dorada mexicana muestran varios elementos importantes que deben ser considerados en el cultivo de las truchas nativas. El primer elemento es la importancia de conservar y mantener el genoma de especies nativas de salmónidos ahora en riesgo y que viven en una situación extrema y de peligro (ver Escalante et al. Capítulo 10, esta obra). El segundo elemento es la facilidad de adaptación a los sistemas acuícolas, como se demostró en este trabajo, la fácil aceptación del alimento comercial para trucha arcoíris, la tasa de crecimiento y la alta sobrevivencia. Los datos indicaron que en dos o tres semanas las truchas silvestres pueden consumir alimento balanceado sin ningún problema, período en el cual generalmente se detecta la mayor mortalidad, aunque esto es común cuando peces

silvestres son introducidos a condiciones controladas. La generación F1 mostró una mejor adaptación, pero una baja tasa de sobrevivencia en relación a la trucha silvestre.

La tendencia de crecimiento de la trucha dorada mexicana es similar a la registrada en la trucha arcoíris. La temporada de reproducción se registró de diciembre a febrero de cada año, cuando la temperatura del agua alcanzó los 10 °C. En promedio se produjeron 6000 huevos por kg de hembra, es decir dos veces el número registrado para la trucha arcoíris en México de acuerdo con Klontz (1991). El crecimiento en cultivo de la trucha dorada en Pt y Lt fue similar a la de la trucha arcoíris (2.4 kg y 58 cm, respectivamente). Las experiencias registradas en el Centro trutícola El Zarco, Estado de México, muestran que es posible cultivar a la trucha arcoíris en tiempos y condiciones de cultivo similares, y la correlación talla-peso es la misma en ambos casos, con un valor de b de 3.0.

Otro aspecto a resaltar es que la mayoría de las granjas productoras de crías de trucha arcoíris en México tienen déficit de machos debido la mayor parte de los casos, a que las líneas importadas son poblaciones 100% hembras seleccionadas a lo largo de las generaciones. En el caso de la trucha dorada mexicana la relación hembra: macho en la muestra silvestre fue de 2:1, lo cual garantiza la posibilidad de tener suficientes machos para mantener la actividad reproductiva a lo largo de los años. Esto representaría una ventaja en nuestro país ya que sería posible asegurar la producción continua de huevos y continuar con el cultivo de esta especie. Sin embargo Ruiz-Luna (Capítulo 6, esta obra) encontró diferencias mínimas en la relación hembra: macho, aunque la proporción de individuos no diferenciados sexualmente fue elevada ( $\geq 50\%$ ) en varias de las muestras obtenidas. Por lo anterior será necesario seguir estudiando la biología de estas especies para tener mayor certeza sobre este importante parámetro poblacional.

Los indicadores de crecimiento de la trucha dorada mexicana mostraron una ganancia constante de Pt y Lt a lo largo del período de cultivo y en sólo seis meses los organismos alcanzaron valores promedio de 300 a 350 g, el cual es el tamaño comercial en México. El valor de  $b = 2.9$  en la correlación talla-peso fue similar al obtenido en cultivo de reproductores y muy cercana a la registrada para la trucha en los sistemas acuícolas de recirculación (Rodríguez 2009; Armendáriz 2009). Comparativamente los indicadores de desempeño del crecimiento mostraron que la tasa específica de crecimiento (TEC) es similar a lo registrado para el cultivo de trucha arcoíris por Thiessen et al. (2003) quienes reportan valores de TEC de entre 1.74 y 1.82% por día<sup>-1</sup> y por Aksnes et al. (2006) con 3.0 a 3.1% por día<sup>-1</sup>. El factor de condición (FC) fue mayor que el reportado por Aksnes et al. (2006).

La ganancia diaria en Pt y Lt fue de 1.72 g y cerca de 0.1 cm, respectivamente. Lo anterior indica que la trucha dorada mexicana presenta un desempeño en el crecimiento similar al de la trucha arcoíris bajo diferentes condiciones de cultivo y temperatura del agua. Sin embargo y a pesar de estos avances, todavía hay muchas preguntas por responder, entre ellas ¿Cuál es la densidad óptima de cultivo de la trucha dorada mexicana? ¿Cuáles son los indicadores de desempeño en el crecimiento bajo diferentes condiciones de cultivo? ¿Cuáles son las enfermedades infecciosas comunes en condiciones de cultivo? ¿Cómo es la adaptación a diferentes condiciones de calidad del agua? Para responder a estas preguntas básicas, es necesario realizar más investigaciones con esta especie y considerar seriamente la creación de un Centro de Referencia para el cultivo de truchas nativas, a fin de evitar la pérdida de este importante genoma y promover la conservación de otras especies de salmónidos nativos que ahora son vulnerables o se encuentran en peligro.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a M. Banda-Cortés y L. Rendón del Centro Acuícola de Guachochi por su apoyo a lo largo del desarrollo del trabajo y por la captura del lote de truchas nativas no identificadas.

## REFERENCIAS

- Abadía-Cardoso, A., J. Carlos Garza, R.L. Mayden and F.J. García-De León. 2015. Genetic structure of Pacific trout at the extreme southern end of their native range. *PLoS ONE* 10(10): e0141775.
- Aho, T., J. Rönn, J. Piironen and M. Björklund. 2006. Impacts of effective population size on genetic diversity in hatchery reared Brown trout (*Salmo trutta* L.) populations. *Aquaculture*. 253: 244–248.
- Altschul, S.F., T.L. Madden, A.A. Schaffer, J. Zhang, Z. Zhang, W. Miller and D.J. Lipman. 1997. Gapped BLAST and PSI-BLAST: a new generation of protein database search programs. *Nucleic Acids Research*. 25: 3389-3402.
- Angers, B., L. Bernatchez, A. Angers and L. Desgroseillers. 1995. Specific microsatellite loci for brook chair reveal strong populationsubdivision on a microgeographic scale. *Journal of Fish Biology*. 47: 177-185.
- Armendáriz, S.N.I. 2009. Evaluación del desempeño productivo de una línea genética seleccionada de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum) cultivada en dos sistemas intensivos. *Tesis Maestría en Biología*. Universidad Autónoma Metropolitana, México, D.F.
- Arredondo-Figueroa, J.L. 1983. Especies animales acuáticas de importancia nutricional, introducidas en México. *Biotica*. 9(1): 23-39.
- Aksnes, A., B. Hope, E. Jonsson, T.B. Bjojnsson and S. Albrektse. 2006. Size-fractioned fish hydrolysate as feed ingredient for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed high plant protein diets. I. Growth, growth regulation and feed utilization. *Aquaculture*. 261:305-317.
- Barriga-Sosa, I.D.L.A., M.Y. Pérez-Ramírez, F. Soto-Aguirre, M. Castillo-Rivera and J.L. Arredondo-Figueroa. 2005. Inter-specific variation of the mitochondrial r16S gene among silversides “Peces Blancos” (ATHERINOPSIDAE: MENIDIINAE) and its utilization for species identification. *Aquaculture*. 250 (3/4): 637-651.
- De Los Santos Camarillo, A.B. 2008. *Definición de unidades taxonómicas en el complejo de truchas del Noroeste de México, mediante el análisis de marcadores microsatélites*. Tesis de Maestro en Ciencias en Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales (Orientación Ecología de Zonas Áridas). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., La Paz, Baja California Sur, México. 106 p.
- Escalante, M.A., F. J. García-De León, C.B. Dillman, A. de los Santos Camarillo, A. George, I.A. Barriga-Sosa, A. Ruiz-Luna, R.L. Mayden and S. Manel. 2014. Genetic introgression of cultured rainbow trout in the Mexican native trout complex. *Conservation Genetics*. 15(5): 1063–1071.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2012. Carta Nacional Acuícola. SAGARPA-CONAPESCA, <http://www.inapesca.gob.mx/portal/publicaciones/carta-nacional-acuicola>.
- Espinosa, H., F.J. García-De León, G. Ruiz, A. Varela, I. Barriga, J.L. Arredondo, D. Hendrickson, F. Camarena y A.B. De los Santos C. 2007. Las Truchas Mexicanas:

- Peces Enigmáticos del Noroeste. *Especies: Revista sobre Conservación y Biodiversidad*. Naturalia A.C. Enero-Febrero: 8-14.
- Hall, T.A. 1999. BioEdit: A user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. *Nucleic Acids Symposium Series*. 41: 95-98.
- Heath, D.D., R.H. Devlin, T.J. Hilbish, G.K. Iwama, 1995. Multilocus DNA fingerprints in seven species of salmonids. *Canadian Journal of Zoology*. 73: 600–606.
- Hendrickson, D.A., H. Espinosa Pérez, L.T. Findley, W. Forbes, J.R. Tomelleri, R.L. Mayden, J.L. Nielsen, B. Jensen, G. Ruiz Campos, A. Varela Romero, A. van der Heiden, F. Camarena and F.J. García-De León. 2002. Mexican native trouts: a review of their history and current systematic and conservation status. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 12: 273-316.
- Hendrickson, D.A., D.A. Neely, R.L. Mayden, K. Anderson, J.E. Brooks, F. Camarena-Rosales, R. Cutter, L. Cutter, A.B. De Los Santos C., G.W. Ernsting, H. Espinoza-Pérez, L.T. Findley, F.J. García-De León, A.L. George, J. Hatch, B.R. Kuhajda, K.E. Mayden, K. Mcnysset, J.L. Nielsen, F.W. Pfeifer, D.L. Propst, G. Ruiz-Campos, E. St. Clair, J.R. Tomelleri and A. Varela-Romero. 2006. Conservation of Mexican native trout and the discovery, status, protection and rediscovery of the Conchos trout, the first native. En: M.L. Lozano-Vilano and A.J. Contreras-Balderas (eds.). *Studies of North American Desert Fishes in Honor of E.P. (Phil) Pister, Conservationist*. Faculty of Biological Sciences, UANL. Mexico. pp. 162-201.
- Klontz, W.G. 1991. *Producción de trucha arcoíris en granjas familiares*. College of Forestry, Wildlife and Range Sciences. University of Idaho, USA. 88 p.
- Kocher, T.D., W.K. Thomas, A. Meyer, S.V. Edwards, S. Paabo, F.X. Villablanca and A.C. Wilson. 1989. Evolution dynamics of mitochondrial DNA evolution in animals: Amplification and sequencing with conserved primers (cytochrome b/12S ribosomal DNA/control region/evolutionary genetics/molecular phylogenies). *Proceedings of the Natural Academy of Sciences*. 86: 6196-6200.
- Machado-Schiaffino, G., E. Dopico and E. Garcia-Vazquez. 2007. Genetic variation losses in Atlantic salmon stocks created for supportive breeding. *Aquaculture*. 264: 59-65.
- Needham, P.R. and R. Gard. 1964. A New Trout from Central Mexico: *Salmo chrysogaster*, the Mexican golden trout. *Copeia*. 1: 169-173.
- Nei, M. 1987. *Molecular Evolutionary Genetics*. Columbia University Press. Ed. New York. p. 164 p.
- Nelson, M.L.B., R.P. Ribeiro, J.A. Povh, P.C. Gomes, L. Vargas y S.N. de Oliveira. 2008. Caracterización genética de lotes de peces usados en programas de repoblamiento y su importancia en la conservación genética en la piscicultura. *Zootecnia Tropical*. 26(4): 515-522.
- Nielsen, J.L. 1996. Using mitochondrial and nuclear DNA to separate hatchery and wild stocks of rainbow trout. *Proceedings of the Symposium of the International Congress on the Biology of Fishes of the American Fishery Society*. San Francisco State University, USA. pp. 139-147.
- Nielsen J.L. 1999. The evolutionary history of steelhead (*Oncorhynchus mykiss*) along the US Pacific Coast: Developing a conservation strategy using genetic diversity. *ICES Journal of Marine Science*. 56: 449–458.
- Nielsen, L.J., C.M. Fountain, C.J. Favela, K. Cobble and L.B Jensen. 1998. *Oncorhynchus* at the southern extent of their range: a study of mtDNA control-region sequence with

- special reference to an undescribed subspecies of *O. mykiss* from Mexico. *Environmental Biology of Fishes*. 51: 7-23.
- Nielsen, J.L., K.D. Crow and M.C. Fountain. 1999. Microsatellite diversity and conservation of a relic trout population: McCloud River redband trout. *Molecular Ecology*. 8:S129-S142.
- Nielsen, L.J. and G.K. Sage. 2001. Microsatellite analyses of the trout of northwest Mexico. *Genetica* 111: 269-279.
- Norris, A.T., D.G. Bradley, E.P. Cunningham, 2000. Parentage and relatedness determination in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) using microsatellite markers. *Aquaculture*. 182: 73–83.
- Palumbi S., A. Martin, S. Romano, W. O. McMillan, L. Stice and G. Grabowski. 1991. *The simple fool's guide to PCR*. University of Hawaii, Honolulu. 34 p.
- Pérez-Enriquez, R., M. Takagi and N. Taniguchi, 1999. Genetic variability and pedigree tracing of a hatchery-reared stock of red sea bream (*Pagrus major*) used for stock enhancement, based on microsatellite DNA markers. *Aquaculture*. 173: 413–423.
- Raymond, M. and F. Rousset. 1995. GENEPOP (version 1.2): population genetics software for exact tests and ecumenicism. *Heredity*. 86: 248-249.
- Ricker, W.E. 1975. *Computation and Interpretation of Biological Statistics of Fish Populations*. Department of the Environment Fisheries and Marine Service. Ottawa, Canada. 401 p.
- Rodríguez, S.E.O. 2009. Evaluación de bioindicadores de cultivo en un sistema cerrado de circulación de una línea Seleccionada de trucha arcoíris. *Tesis Maestría en Ciencias del Mar*. Universidad de Colima.
- Rozas, J. and R. Rozas. 1999. DnaSP version 3: an integrated program for molecular population genetics and molecular evolution analysis. *Bioinformatics*. 15: 174-175.
- Ruiz-Campos, G., F. Camarena-Rosales, A. Varela-Romero, S. Sánchez-González and J. De La Rosa-Vélez. 2003. Morphometric variation of wild trout populations from northwestern Mexico (Pisces: Salmonidae). *Review in Fish Biology and Fisheries*. 13: 91-110.
- Ruiz-Luna, A. 2016. Relaciones biométricas y aspectos poblacionales de la trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* en las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, México. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.) *La trucha dorada mexicana*. Cap. 6.
- Spidle, A.P., T.L. Kinga and B.H. Letcher. 2004. Comparison of genetic diversity in the recently founded Connecticut River Atlantic salmon population to that of its primary donor stock, Maine's Penobscot River. *Aquaculture*. 236: 253–265.
- Tan, G., A. Karsi, P. Li, S. Kim, X. Zheng, H. Kucuktas, B.J. Argue, R.A Dunham and Z.J. Liu, 1999. Polymorphic microsatellite markers in *Ictalurus punctatus* and related catfish species. *Molecular Ecology*. 8: 1758–1760.
- Taylor, E.B., M.D. Stamford and J.S. Baxter. 2003. Population subdivision in westslope cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki lewisi*) at the northern periphery of its range: evolutionary inferences and conservation implications. *Molecular Ecology*. 12: 2609–2622.
- Thiessen, L.D., L.G. Campbell, L.G and D.P. Adelizi. 2003. Digestibility and growth performance of juveniles rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed with pea and canola products. *Aquaculture nutrition*. 9:67-75.

- Thongpan, A., M. Mingmuang, S. Thinchant, R. Cooper, T. Tiersch and K. Mongkonpunya, 1997. Genomic identification of catfish species by polymerase chain reaction and restriction enzyme analysis of the gene encoding the immunoglobulin M heavy chain constant region. *Aquaculture*.156: 129–137.
- Thrower F., Ch. Guthrie III, J. Nielsen and J. Joyce. 2004. A comparison of genetic variation between an anadromous steelhead, *Oncorhynchus mykiss*, population and seven derived populations sequestered in freshwater for 70 years. *Environmental Biology of Fishes*. 69: 111–125.
- Utter, F. and F.W. Allendorf. 1994. Phylogenetic relationships among species of *Oncorhynchus*: a consensus view. *Conservation Biology*. 8:864-867.
- Valiente, A. G., F. Juanes, P. Nuñez and E. Garcia-Vazquez. 2007. Is genetic variability so important? Non-native salmonids in South America. *Journal of Fish Biology*. 71: 136–147.
- Wilson, MF. 1997. Variation in salmonid life histories: Patterns and perspectives. *Res. Pap. PNW-RP-498*. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 50 p.
- Wilson W.D. and T.F. Turner. 2009. Phylogenetic analysis of the Pacific cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki* ssp.: Salmonidae) based on partial mtDNA ND4 sequences: A closer look at the highly fragmented inland species. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 52: 406–415
- Zardoya R., A. Garrido-Pertierra and J.M. Bautista. 1995. The complete nucleotide sequence of the mitochondrial DNA genome of the rainbow Trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Journal of Molecular Evolution*. 41: 942-951.