La Trucha Dorada Mexicana

ARTURO RUIZ-LUNA
FRANCISCO JAVIER GARCÍA-DE LEÓN

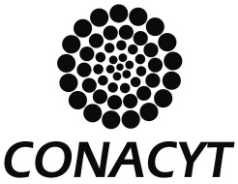
Editores

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 màs 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. *marko.escalante@gmail.com*
Espinosa Pérez, Héctor	Colección Nacional de Peces. Instituto de Biología, UNAM. Ciudad Universitaria, 3er Circuito Exterior s/n. Coyoacán, CDMX. 04510. México. *hector@unam.mx*
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. *fgarciadl@cibnor.mx.*
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. *aacosta@ipn.mx*
Hernández Guzmán, Rafael	Catedrático CONACYT - Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. San Juanito Itzícuaro s/n. Col. Nueva Esperanza, Morelia, Michoacán. 58330. México. *rhernandez.g@gmail.com*
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. *genovevaingle@yahoo.com.mx*
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 trabajó 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, allá 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 Ruiz 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 Ruiz-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

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

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

INTRODUCCIÓN

La gestión de recursos naturales, sea para propósitos de aprovechamiento, manejo o conservación, requiere de información más o menos precisa sobre la ubicación y abundancia de un recurso determinado. Particularmente para especies que se encuentran sometidas a una fuerte presión ambiental o cuya historia natural es poco conocida, esta situación es crítica, pues de este conocimiento se pueden derivar las estrategias requeridas para su mantenimiento y conservación.

En esas circunstancias se encuentra un grupo de truchas nativas de México (*Oncorhynchus* spp.), peces de agua dulce pertenecientes a la familia Salmonidae, que representan el límite natural de distribución austral (Behnke y Tomelleri 2002), considerando que la distribución geográfica natural de lo salmónidos se limita al hemisferio norte, particularmente asociados con zonas montañosas de climas templados y fríos (Contreras-Balderas y Escalante 1984; Behnke y Tomelleri 2002; Espinosa et al. 2007; Miller et al. 2009). Cabe mencionarse que diversas especies de la familia han sido introducidas a nivel mundial, con fines de cultivo y para la pesca deportiva.

Aunque estudios recientes consideran que las truchas mexicanas forman un complejo de especies (Hendrickson et al. 2002, 2006; Mayden 2005; Escalante et al. 2014; Abadía-Cardoso et al. 2015), que probablemente rebase la decena de especies, en la Sierra Madre Occidental (SMO) solo la denominada trucha dorada mexicana, *O. chrysogaster* (Needham y Gard 1964), ha sido descrita formalmente, asociando su área de distribución natural con la cuenca alta de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, en altitudes superiores a los 1500 msnm (Camarena-Rosales et al. 2001; Hendrickson et al. 2006; Reyes-Valdez et al. 2006; Espinosa et al. 2007).

Las evidencias genéticas sugieren que la trucha dorada mexicana pertenece a un linaje genético único, sin embargo se tiene la certidumbre de que la introducción con propósitos de cultivo de la trucha arcoíris (*O. mykiss* (Walbaum 1792)) ha propiciado distintos grados de introgresión genética, es decir el intercambio de genes de una especie a otra por efecto de hibridación, situación asociada principalmente con un mal manejo de la actividad acuícola (Escalante et al. 2014; Escalante et al. Capítulo 10, esta obra). Aunado a lo anterior, actividades humanas como la deforestación, pesca y minería, sitúan a la trucha dorada en un escenario desfavorable, por lo que se le ha reconocido como especie vulnerable, en riesgo o en peligro de extinción por instancias nacionales (Norma Oficial Mexicana; NOM-059-SEMARNAT-2010) e internacionales (IUCN 2015).

Ante la amenaza de extinción de *O. chrysogaster* y en general de las truchas nativas de México, tanto a nivel local como regional, se han generado diversas iniciativas en años recientes, con el fin de incrementar el conocimiento que sobre estas especies se tiene (Hendrickson et al. 2002, 2006; Ruiz-Luna et al. 2013), proporcionando así elementos que

coadyuven a la gestión de este recurso de importancia regional, pero sobre todo para su mantenimiento y conservación, posiblemente a través de proyectos para su protección y para cultivo (Barriga-Sosa et al. ver Capítulo 11, esta obra).

Por lo anterior, se requiere de información sobre la biología y ecología de estas especies, siendo determinante el conocimiento sobre la extensión y características de su área de distribución. De acuerdo con Hendrickson et al. (2002), que ubican los primeros registros de trucha en la SMO a finales del siglo XIX, no es sino a mediados del siglo XX cuando se empieza a sistematizar el registro en diversas localidades, ubicándose particularmente en Durango y Chihuahua. El registro se incrementó y ha ido mejorando a raíz de la organización del grupo binacional Truchas Mexicanas (México-EUA; http://w3.biosci.utexas.edu/tnhc/fish/research/truchas_mexicanas/), a fines de la década de 1990.

Con todo y esta iniciativa, hasta el año 2009 el número de registros para trucha en la SMO es relativamente reducido (<300), considerando la amplitud geográfica de los mismos, restringida a altitudes superiores a los 1500 msnm. La insuficiencia de datos es la resultante de la falta de un programa de monitoreo y que se ha limitado históricamente por la dificultad de acceso a la zona de distribución de estos peces y a la inseguridad provocada por la problemática social que se vive en la región (Hendrickson 2006; Ruiz-Luna et al. 2013).

Para contrarrestar este tipo de situaciones donde existe insuficiencia de datos, se han generado técnicas basadas en herramientas estadísticas asociadas a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), a partir de las cuáles es posible generar modelos de distribución de especies (Guisan y Zimmermann 2000; Scott et al. 2002), inclusive para especies dispersas en áreas grandes, permitiendo la reducción del esfuerzo y ampliando las posibilidades de éxito de localización, aún para especies en peligro de extinción, cuyos tamaños poblacionales son reducidos. Aun para estas situaciones extremas, los métodos desarrollados pueden ser viables con un reducido número de registros, como lo refieren Proosdij et al. (2015), quienes evaluaron el desempeño de los modelos de distribución de especies (SDM por sus siglas en Inglés), encontrando valores entre 14 y 25 registros para distintas situaciones en condiciones reales.

El desarrollo de SDM, que involucra distintas técnicas, intenta contrarrestar la carencia de información (Guisan y Zimmermann 2000; Araújo y Peterson 2012) y se basa en el conocimiento de las condiciones ambientales de los sitios conocidos con ocurrencias de las especies objetivo. A partir de dicha información es posible proponer un modelo de distribución potencial de la especie, con un nivel asociado de incertidumbre, útil para propósitos de monitoreo (Anderson 2003; Guisan y Thuiller 2005).

El método de modelación requiere datos de localidades donde ha sido confirmada la presencia de la especie a estudiar y sus variables ambientales asociadas, a partir de lo cual se genera un modelo de requerimientos de la especie o modelo de nicho ecológico (Anderson 2003; Soberón y Nakamura 2009; Soberón 2010; Peterson y Soberón 2012), que puede ser proyectado geográficamente, proveyendo información útil para la identificación del área de distribución y mejorar la planificación y manejo del recurso en un contexto de conservación (Naoki et al. 2006; Torres y Jayat 2010).

Particularmente relacionados con la SMO, se cuenta con dos trabajos previos en los que se han generado modelos sobre la distribución de especies del género *Oncorhynchus*. El primero fue propuesto por Hendrickson et al. (2006) a partir de la aplicación del algoritmo GARP (*Genetic Algorithm of Rule-Set Prediction*) que fue desarrollado por

Stockwell y Peters (1999), con el cual fue posible identificar y verificar en campo nuevas localidades de ocurrencia de truchas en la cuenca del río Conchos, para las que no se tenían registros previos (Mayden 2005; Hendrickson et al. 2006). Por otra parte Ruiz-Luna et al. (2013) generaron un modelo de distribución potencial para la trucha dorada mexicana *O. chrysogaster* con la aplicación del modelo MaxEnt (*Maximum Entropy Modeling*; Phillips et al. 2006), obteniéndose resultados con un relativo sesgo debido a la mejor representación de registros para la cuenca de río Fuerte, uno de los tres ríos considerados dentro del área de distribución de la trucha dorada mexicana. Por lo anterior el presente estudio se centró en la generación de un modelo de distribución y su validación para las dos cuencas restantes, ríos Sinaloa y Culiacán, generando más información correspondiente a estas cuencas para tal propósito.

MÉTODOS

Área de estudio y registros de trucha dorada mexicana

El área de estudio, ubicada en la región noroeste de la SMO, se determinó a partir de los límites de cuenca de los ríos Sinaloa y Culiacán, descargados del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/?s=geo&c=1693&e=00#), acotando el espacio a una altitud mínima de 1500 msnm, con base en un polígono derivado de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) con resolución de 15 metros, a partir de los cuales se extrajeron las curvas de nivel. La extensión final del área de estudio es de aproximadamente 9160 km^2 y se encuentra dentro de las coordenadas extremas 24°45' y 26°29'N, 107°28' y 105°44'O (Fig. 1).

El área de estudio es geológicamente compleja y provee una gran diversidad de ambientes terrestres, dominados por coníferas y pastizales, así como de ambientes acuáticos que fueron delineados generando una red hidrográfica siguiendo los métodos descritos por Hernández-Guzmán (2006) y Lin et al. (2006). Finalmente se obtuvieron los órdenes de cauce (*Stream Order*) mediante el método propuesto por Strahler (1957), con las modificaciones propuestas por Hernández-Guzmán (2006). Los procedimientos anteriores y otros posteriores que implicaron el uso de capas en formato raster o vectorial, así como la elaboración de mapas se llevaron a cabo con aplicaciones de SIG con el programa ArcGIS 10.1.

Los registros de ocurrencia de truchas en la región de estudio fueron recabados a partir de la publicación de Hendrickson et al. (2002), así como de la base de datos proporcionada por el grupo binacional Truchas Mexicanas. De igual manera se revisaron distintas bases de datos de libre acceso, tanto internacionales como nacionales como *Global Biodiversity Information Facility* (http://www.gbif.org/species/); la colección ictiológica de la Academia de Ciencias de California (http://collections.calacademy.org/ich) y la Colección Nacional de Peces (http://www.ibiologia.unam.mx/peces/Peces.htm).

Para propósitos del presente estudio, se incrementaron y actualizaron los registros de trucha dorada mexicana dentro de su área de distribución, realizándose una serie de muestreos entre febrero del 2013 y junio de 2015, llevándose a cabo principalmente durante la época de secas, cuando el flujo de agua permite realizar la actividad. La campaña de muestreo se llevó a cabo en localidades para las que se cuenta con registro histórico así como explorando localidades nuevas. Las capturas se realizaron con el uso de electropesca (Smith-Root, Inc.; 15-D POW), registrándose la posición geográfica del sitio con el sistema de coordenadas UTM, posteriormente estandarizadas con el resto de las localidades a

coordenadas geográficas (latitud – longitud), en formato grados decimales. Adicionalmente se registró la altitud (msnm) y se obtuvieron fotografías georreferenciadas con equipos GPS GARMIN modelo Rino 655t.

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

Para la base de datos final se utilizaron solamente aquellos datos históricos que contaron con información geográfica suficiente para identificar positivamente el sitio de registro, verificando que correspondiera con la información proporcionada por los recolectores y que la posición correspondiera a sitios al menos próximos a ríos o arroyos identificables a través de *Google Earth*. Finalmente se eliminaron coincidencias o puntos cuya cercanía aportaba escasa información dentro del proceso de modelado.

Modelos de distribución.

Para generar los mapas de distribución potencial de la trucha dorada mexicana en la región de estudio se emplearon dos aproximaciones metodológicas basadas en registros de presencia, ambas usadas previamente en la SMO (Hendrickson et al. 2006; Ruiz-Luna et al.

2013), si bien los resultados de las experiencias previas se derivaron con todos los registros disponibles para *Oncorhynchus* spp., no necesariamente asociados con alguna cuenca en específico.

El primer método es conocido como GARP y su aplicación se encuentra disponible en el programa DesktopGARP v.1.1.6 (http://www.nhm.ku.edu/desktopgarp/). El otro método de modelación es conocido como Maxent, disponible en línea en su versión MaxEnt 3.3.3k (http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/). Elegimos estos algoritmos debido a que: (1) son de uso común; y (2) se ha encontrado que funcionan bien para pequeños tamaños de muestra; sin embargo, (3) son sensibles a los ajustes del algoritmo que afectan la complejidad del modelo (Phillips y Dudík 2008; Shcheglovitova y Anderson 2013; Morales et al. 2015).

Ambos algoritmos identifican áreas geográficas con las condiciones adecuadas para la especie, con base en datos conocidos de ocurrencia. Parten de información incompleta sobre los requerimientos ambientales de las especies, retomando los valores de las condiciones ambientales encontradas en las localidades donde se ha registrado la presencia de la especie estudiada, derivando de ellas las condiciones aptas para su desarrollo. Son dos de los métodos más empleados para la modelación de nicho, siendo común su comparación ya que ambos están sujetos a error y generan sesgo, requiriendo ambos de mayor análisis y desarrollo para garantizar resultados (Peterson et al. 2007).

Para su aplicación se descargaron 19 capas raster con resolución espacial de 1 km, representando variables bioclimáticas del proyecto WorldClim versión 1.4 (Hijmans et al. 2005), correspondientes a la zona 22 de dicho sistema (http://www.worldclim.org). Adicionalmente se incluyeron capas correspondientes a un modelo altitudinal y al Índice Topográfico Compuesto (CTI) del proyecto HYDRO1k (https://lta.cr.usgs.gov/HYDRO1K), con la misma resolución espacial, siendo acotadas a los límites geográficos del área de estudio.

Se descartaron las variables altamente correlacionadas entre sí ($\geq$0.90), para evitar redundancia y una vez definidas las capas, se procedió a la aplicación de ambos métodos. Para el algoritmo GARP se utilizó el 100% de los datos, ajustando el programa para desarrollar 100 modelos independientes con un máximo de 1000 iteraciones y un límite de convergencia de 0.01. Los mapas resultantes son de tipo binario (ausencia = 0; presencia = 1) y del total obtenido, se seleccionaron los diez mejores en función del tamaño del error de omisión (<10%) y del error de comisión (> 50%). A partir de este juego de mapas se generó el mapa consenso (suma de los mapas), que representa la distribución geográfica potencial de la especie con valores de 1 a 10, de acuerdo al procedimiento descrito por Anderson (2003). Finalmente se procedió a reclasificar dicho mapa considerando solamente el área con valor de 10, al que se asignó un valor de 1, mientras que para áreas con valores inferiores se asignó el valor de cero, generando un nuevo mapa que representa localidades con presencia (1) y con ausencia (0) de la especie. Los puntos que representan las localidades con registro de presencia fueron agregados como una capa adicional en el mapa, para verificar si el modelo los predice en su totalidad.

Para la aplicación del algoritmo MaxEnt, que intenta ajustar distribuciones de probabilidad de ocurrencia de la especie, se utilizaron los parámetros de entrada definidos por defecto por el programa con la opción *Auto Features* activada, pero sin extrapolar a regiones del espacio ambiental fuera de los límites encontrados durante el entrenamiento, esto genera una representación de la probabilidad acumulativa de ocurrencia de la especie que adquiere valores de 0 a 1, para posteriormente obtener un mapa binario de presencia (1)

y ausencia (0), utilizando el criterio del valor mínimo de presencia (*minimum training presence*). Bajo esta regla de umbral, los pixeles con valores iguales o mayores que el umbral de presencia más bajo se consideran adecuados, mientras que los pixeles con valores por debajo de ella no lo son (Anderson y Raza 2010).

Evaluación de los modelos

Para la evaluación de los modelos y considerando el reducido número de localidades con registro para la especie, se procedió a aplicar el método estadístico de remuestreo Jackknife descrito por Pearson et al. (2007). Con este procedimiento cada una de las localidades se remueve una vez del grupo de datos y se construye el modelo usando las localidades restantes *n*-1. Por lo tanto, para la especie con *n* localidades observadas, *n* modelos fueron construidos. Posteriormente se evaluó el rendimiento predictivo basado en la capacidad de cada modelo para predecir la localidad excluida del conjunto de datos. El nivel de significancia del conjunto de modelos fue evaluado con base a valor de probabilidad *p,* siguiendo lo descrito en Pearson et al. (2007) utilizando el programa ejecutable *pValueCompute*, desarrollado por el Centro de Investigación en Matemáticas, A.C. (CIMAT). Un valor de $p \leq 0.05$ para las pruebas de Jackknife indica que las localidades de evaluación (o de prueba) son predichas mejor que una predicción al azar (Anderson y Raza 2010). Finalmente, para permitir una evaluación estandarizada de los dos modelos empleados, las predicciones se expresaron como mapas binarios (1/0) presencia-ausencia.

RESULTADOS

Registros de O. chrysogaster en la zona de estudio

De acuerdo con los métodos empleados se determinó que ambas cuencas presentan un patrón de drenaje dendrítico, caracterizado por numerosos y pequeños tributarios que se unen en un ángulo agudo con uniones en Y a arroyos de mayor jerarquía, formando eventualmente los ríos más grandes. La red hidrográfica generada para la zona de estudio, cuenta con una longitud total aproximada de 5500 km, que en mayor proporción (80%) corresponden a arroyos primarios de orden de cauce 1 (2850 km) y 2 (1529 km), principalmente situados en la cuenca del río Culiacán (Fig. 2).

Para esta región se obtuvo un total de 31 registros de ocurrencia de trucha dorada mexicana, con referencia geográfica, correspondiendo 14 de los mismos a registros históricos obtenidos entre 1953 y hasta 2009. Los restantes 17 registros fueron obtenidos durante el presente estudio (2013-2015), algunos de los cuáles se realizaron en los sitios históricos para verificar la presencia actual de truchas, pero al mismo tiempo se registraron localidades nuevas (12).

Durante el proceso de depuración, la mayoría de los registros históricos fueron substituidos por los registros más actuales realizados en las mismas localidades, eliminándose también los puntos cuya cercanía aporta poco al proceso de modelado, por lo que la base de datos final contiene un total de 18 registros de presencia de *O. chrysogaster*, de los que 11 se obtuvieron dentro de los límites de la cuenca del Sinaloa y 7 en la del Culiacán.

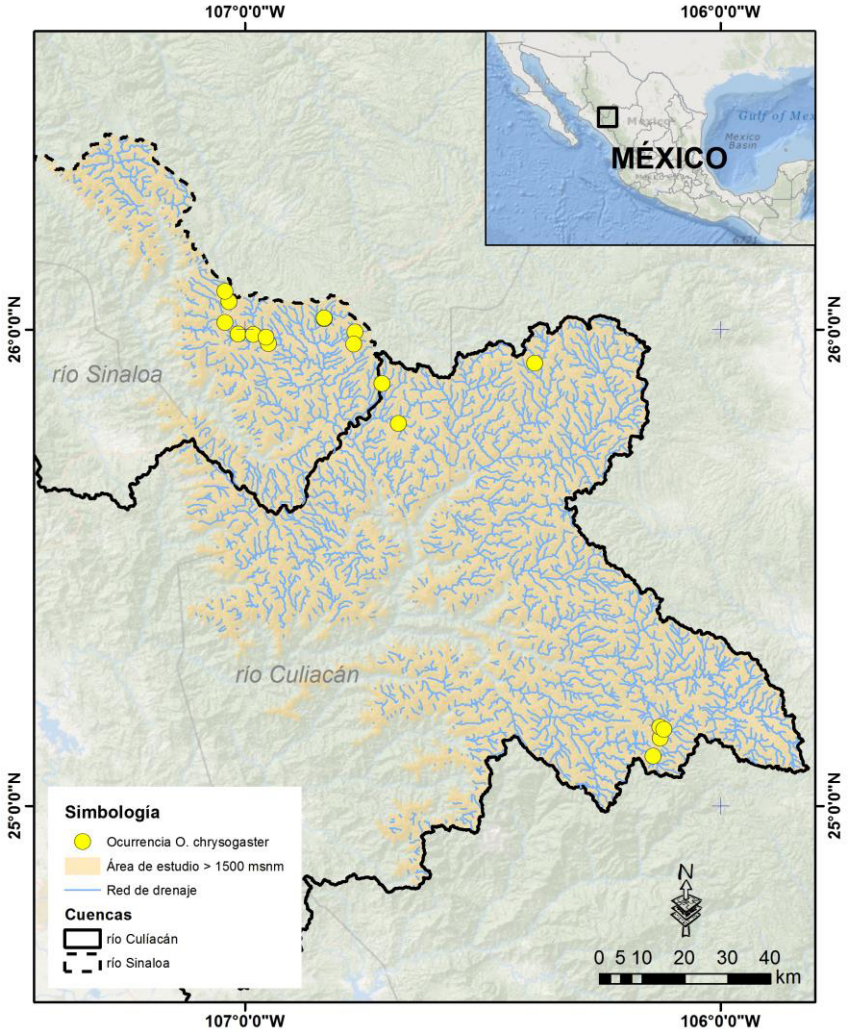


Figura 2. Red de drenaje de las cuencas del Sinaloa y Culiacán y localización de los sitios con registro de trucha dorada mexicana, Oncorhynchus chrysogaster en el área de estudio.

De los anteriores, solamente tres registros forman parte del padrón histórico y el resto fue obtenido en las campañas realizadas dentro del presente estudio, obteniéndose el registro más austral en la cuenca del río Culiacán, realizándose la mayoría de las capturas en arroyos de orden de cauce 2 de la cuenca hidrográfica, capturándose a los especímenes en altitudes superiores a 2200 msnm (Tabla 1).

Tabla 1. Registros de presencia de trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster* en las cuencas de los ríos Sinaloa y Culiacán. Institución o Colección de referencia (SLU: Saint Louis University; CIAD Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo; CAS: California Academy of Sciences), datos de referencia geográfica y orden de cauce de la red hídrica donde se obtuvo la muestra.

Id	Cuenca	Colección	Fecha Colecta	Latitud	Longitud	Elevación (m)	Orden de cauce
1	Sinaloa	SLU	2007	25.995	-106.768	2517	2
2	Sinaloa	CIAD	2014	26.059	-107.033	2617	2
3	Sinaloa	CIAD	2014	25.991	-107.014	2412	2
4	Sinaloa	CIAD	2014	25.990	-106.982	2334	3
5	Sinaloa	CIAD	2014	25.971	-106.950	2314	2

6	Sinaloa	CIAD	2014	25.984	-106.955	2261	3
7	Sinaloa	CIAD	2014	26.081	-107.042	2480	2
8	Sinaloa	CIAD	2014	26.015	-107.042	2638	1
9	Sinaloa	CIAD	2015	25.970	-106.771	2447	3
10	Sinaloa	CIAD	2015	26.023	-106.833	2391	2
11	Sinaloa	CIAD	2015	26.025	-106.833	2398	2
12	Culiacán	CIAD	2015	25.803	-106.677	2340	2
13	Culiacán	CAS	1953	25.930	-106.390	2734	2
14	Culiacán	SLU	2007	25.887	-106.711	2435	2
15	Culiacán	CIAD	2014	25.105	-106.141	2438	2
16	Culiacán	CIAD	2014	25.143	-106.126	2309	2
17	Culiacán	CIAD	2014	25.166	-106.127	2256	3
18	Culiacán	CIAD	2014	25.161	-106.119	2251	3

Variables ambientales

De las 21 capas seleccionadas en formato raster, que incluían variables climáticas y fisiográficas representativas de clima y fisiografía del área de estudio, se seleccionaron solo aquellas menos correlacionadas y con significación biológica. Dichas variables son representativas de la temperatura, precipitación y del perfil topográfico de la zona de estudio (Tabla 2).

Tabla 2. Total de variables climáticas y fisiográficas ambientales derivadas de WorldClim e Hydro 1K y las seleccionadas para el análisis, asociadas con su contribución (%) al modelo Maxent.

Tipo de variable	Clave	Descripción	Incluida
Climáticas	BIO1	Temperatura media anual	
	BIO2	Rango de temperatura media diurna	
	BIO3	Isotermalidad	13.0%
	BIO4	Estacionalidad de la temperatura	
	BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido	17.7%
	BIO6	Temperatura mínima del mes más frío	21.4%
	BIO7	Amplitud térmica anual	
	BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo	
	BIO9	Temperatura media del trimestre más seco	
	BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido	
	BIO11	Temperatura media del trimestre más frío	
	BIO12	Precipitación anual	
	BIO13	Precipitación del mes más húmedo	
	BIO14	Precipitación del mes más seco	
	BIO15	Estacionalidad de la precipitación	
	BIO16	Precipitación media del trimestre más húmedo	15.6%
	BIO17	Precipitación media del trimestre más seco	
	BIO18	Precipitación media del trimestre más cálido	
	BIO19	Precipitación media del trimestre más frío	16.9%
Topográficas	Alt	Altitud (msnm)	
	CTI	Índice Compuesto Topográfico	15.4%

Las variables seleccionadas corresponden a un índice de Isotermalidad (BIO3) que es un indicador de variabilidad de la temperatura, derivado de una relación entre el rango de temperatura media diurna (BIO2) y la amplitud térmica anual (BIO7). Adicionalmente los valores de temperatura extrema más cálida (BIO5) y más fría (BIO6) formaron parte de las variables seleccionadas. Con relación a la precipitación, se consideraron los periodos de mayor precipitación en el trimestre más húmedo (BIO16) y del más frío (BIO19). Finalmente un índice compuesto que considera la pendiente y flujo (CTI).

Modelos

Los resultados que se obtuvieron con las dos aproximaciones metodológicas fueron muy similares, si bien presentan diferencias, particularmente asociadas con la altitud. El modelo de consenso generado con los diez mejores mapas obtenidos con GARP resultó ligeramente menor en superficie, que el producido con Maxent. En la figura 3 se observa el área acotada a niveles de 1500 msnm o mayores, para las dos cuencas estudiadas. El área definida por el modelo se presenta en color café oscuro, concentrándose en altitudes superiores al límite de los 1500 m, quedando vacíos hacia el noroeste, noreste y más específicamente al sur.

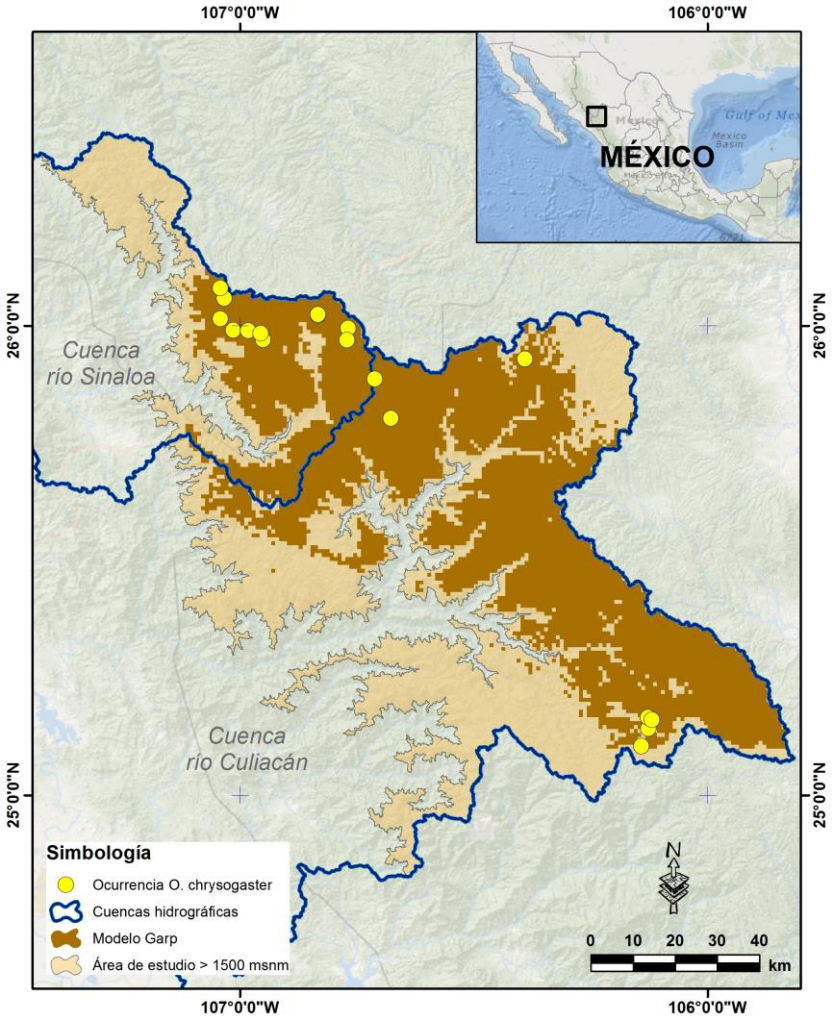


Figura 3. Área de distribución potencial y localidades de registro de trucha dorada mexicana, Oncorhynchus chrysogaster en las cuencas de los ríos Sinaloa y Culiacán, a partir del modelo GARP.

En el caso del modelo generado con Maxent (Fig. 4), el área de distribución potencial se extiende ligeramente y cubre parte de las áreas no incorporadas por el modelo GARP, alcanzando altitudes cercanas a los 1500 msnm, sobre todo al norte del área de estudio, por lo que prácticamente toda la cuenca del río Sinaloa, por encima de los 1500 se observa como apta para la distribución de la trucha dorada.

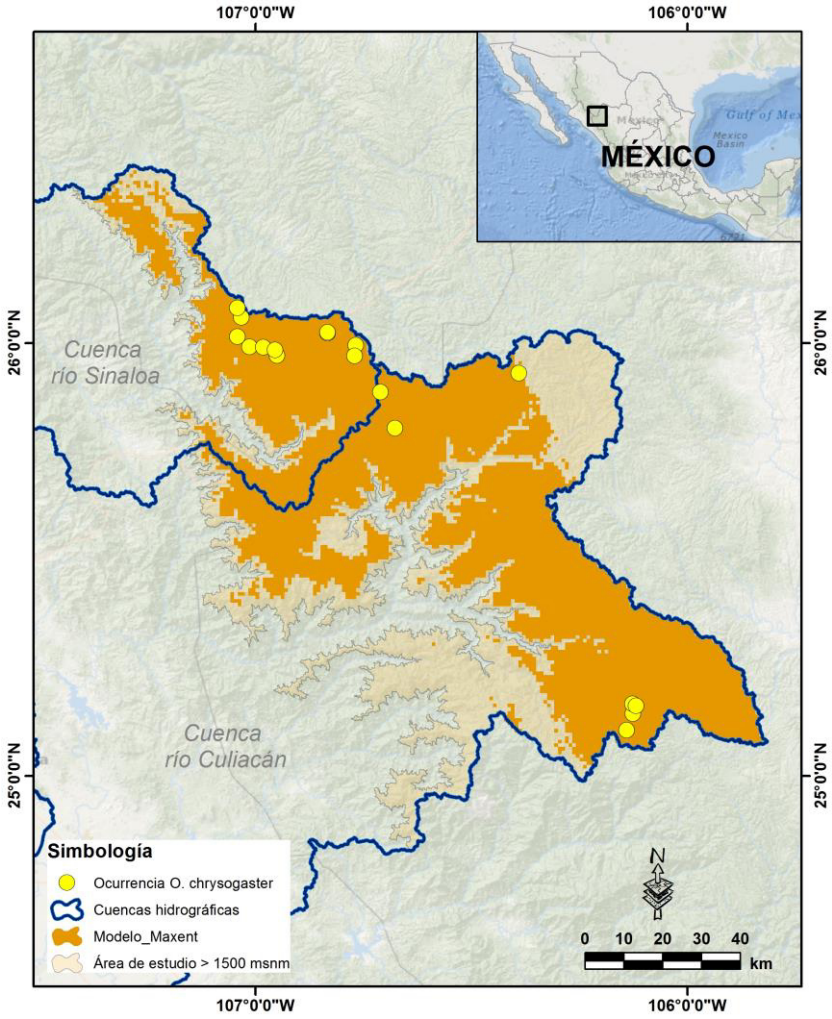


Figura 4. Área de distribución potencial y localidades de registro de trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* en las cuencas de los ríos Sinaloa y Culiacán, a partir del modelo de Máxima Entropía (MaxEnt).

La superposición de ambos modelos genera una superficie que coincide en aproximadamente un 85% y que para propósitos de este estudio se considera como la zona de distribución de la trucha dorada mexicana, con mayor probabilidad de ocurrencia y en la que se observa coincidencia con los registros de trucha realizados en campo (Fig. 5).

La diferencia de superficie entre ambos modelos es ligeramente superior a 1000 km^2 y como ya se señaló anteriormente, la mayor superficie correspondió al modelo Maxent

(5540 km^2) y considerando que el área total de estudio es de aproximadamente 9100 km^2, la estimación generada con Maxent representa más del 60% del total.

Siguiendo un razonamiento similar, la superficie obtenida con GARP solo representó poco menos del 50%, con una superficie estimada en 4310 km^2. Una vez que se obtuvo el solapamiento de superficies, la superficie ocupada es similar a la producida por GARP, sin embargo no coinciden en su totalidad, destacando un área al noreste de la zona de estudio, en la cuenca del Culiacán.

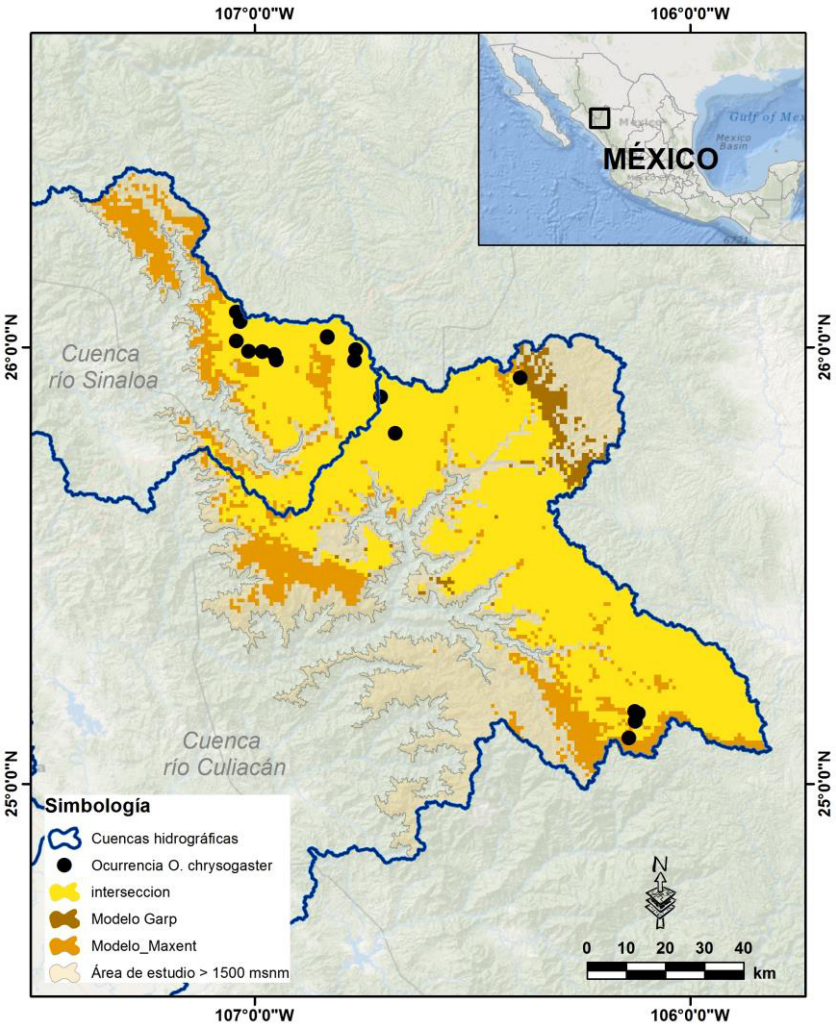


Figura 5. Área de distribución potencial y localidades de registro de trucha dorada mexicana, Oncorhynchus chrysogaster en las cuencas de los ríos Sinaloa y Culiacán, con coincidencia en los resultados derivados del modelo GARP y el de Máxima Entropía (MaxEnt).

Con relación al modelo Maxent, las principales diferencias están en zonas localizadas al noroeste y al sur, en altitudes más próximas al límite inferior de altitud. Cabe mencionarse que las diferencias se minimizan cuando solo se considera la red hidrográfica, que es prácticamente la misma y donde hay una elevada coincidencia con las localidades con registro de trucha nativa.

Validación

El método de validación Jackknife mostró que las dos aproximaciones aplicadas fueron adecuadas, considerando únicamente el *p*-valor de significancia del análisis (< 0.005). Sin embargo, el total de éxitos obtenidos por cada modelo (número de posiciones predichas positivamente) fue menor para el modelo de GARP (83%), a diferencia del obtenido por el modelo MaxEnt (94%).

Las dos aproximaciones coinciden en no predecir el sitio de recolecta identificado con el número 13, que de acuerdo con la fecha de recolecta pertenece a un registro histórico (1953), siendo éste el más antiguo que se utilizó para el proceso de modelado y que se ubica dentro de la cuenca del río Culiacán. En general, MaxEnt fue el método con mayor capacidad predictiva, ya que no predijo un sitio de los 18; seguido de GARP el cual dejó tres sitios sin predecir, uno para la cuenca del río Sinaloa y dos en la cuenca del río Culiacán, incluyendo el ya mencionado.

Los resultados del test, con relación a los casos de éxito y valor de probabilidad (*p*), se incluyen en la Tabla 3, en general, la capacidad predictiva de los diferentes modelos fue buena.

Tabla 3. Porcentaje de éxito y significancia de la prueba Jackknife aplicada a los modelos GARP y MaxEnt para trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster* en las cuencas de Culiacán y Sinaloa.

Id	Fecha Colectada	Localidad	Cuenca	GARP	MaxEnt
1	2007-04-15	Arroyo Rancho de El Medio	Sinaloa	1	1
2	2014-03-27	Arroyo Macheras	Sinaloa	1	1
3	2014-03-28	Arroyo El Soldado	Sinaloa	1	1
4	2014-03-28	Arroyo Osera	Sinaloa	1	1
5	2014-05-29	Arroyo Hondo	Sinaloa	1	1
6	2014-05-29	Arroyo Baluarte	Sinaloa	0	1
7	2014-05-30	Arroyo Potrero	Sinaloa	1	1
8	2014-05-30	Arroyo San Miguel	Sinaloa	1	1
9	2015-05-13	Arroyo Cerro Solo	Sinaloa	1	1
10	2015-05-13	Arroyo Pericos	Sinaloa	1	1
11	2015-05-13	Arroyo Cebollín	Sinaloa	1	1
12	2015-05-12	Arroyo Agua Blanca o La Mesa	Culiacán	1	1
13	1953-08-11	Arroyo Dulces Nombres	Culiacán	0	0
14	2007-04-16	Arroyo Santa Rosa	Culiacán	1	1
15	2014-02-18	Arroyo San Juan del Negro	Culiacán	0	1
16	2014-02-19	Arroyo El Desecho	Culiacán	1	1
17	2014-02-23	Arroyo El Río I	Culiacán	1	1
18	2014-02-23	Arroyo El Río II	Culiacán	1	1
			p-valor	< 0.005	< 0.005
			Tasa de éxito	0.8333	0.9444

DISCUSIÓN

Particularmente relacionado con el presente estudio, existen dos modelos generales de distribución para el género *Oncorhynchus* para la SMO, el primero propuesto por Mayden

(2005) y su equipo de investigadores generado a partir de la aplicación de GARP (Stockwell y Peters 1999) y el segundo propuesto por Ruiz-Luna et al. (2013) generado a partir de la aplicación de MaxEnt (Phillips et al. 2006). Ambos trabajos de investigación se enfocan en las cuencas que se distribuyen a lo largo de la SMO, el primer acercamiento puede resultar un poco ambiguo aunque en su momento fue de utilidad, ya que permitió identificar ríos y regiones con alta probabilidad de contener poblaciones de truchas nativas y priorizar el esfuerzo de muestreo en la cuenca del río Conchos y como resultado de estas predicciones fue posible identificar y verificar en campo, nuevos sitios con la presencia de una especie de trucha aun no descrita dentro de esta cuenca (Hendrickson et al. 2002, 2006; Mayden 2005). El segundo acercamiento se enfocó en generar el modelo de distribución potencial para los salmónidos que se distribuyen en la SMO considerando los 1500 msnm como la cota límite inferior de distribución, utilizando registros con referencia geográfica de la especie *O. chrysogaster*.

Es importante mencionar que las dos técnicas aplicadas en el presente trabajo tienen diferentes arquitecturas (GARP – Algoritmo genético; MaxEnt – Principio de la máxima entropía). Debido a los elementos estocásticos en el algoritmo de GARP (múltiples soluciones con el mismo valor del criterio de optimización), no se produce una solución única, por lo tanto, la variabilidad entre los modelos GARP (típico de los algoritmos genéticos) y las complicaciones en la interpretación de los resultados basados sólo en datos de entrada asimétricos (presencia), hace crítica la selección del modelo (Anderson et al. 2003). MaxEnt por su parte, se centra en el ajuste de una distribución de probabilidad de ocurrencia de la especie en cuestión al conjunto de pixeles a través de la región de estudio, basado en la idea de que la mejor explicación de los fenómenos desconocidos maximizará la entropía de la distribución de probabilidad, sujeto a las restricciones apropiadas (Phillips et al. 2006).

Los resultados de nuestra validación sugieren que ambos modelos definen bien el área de distribución potencial de *O. chrysogaster*. GARP y MaxEnt se desempeñan de manera similar; ambos son algoritmos potentes en la caracterización de nicho ecológico, ambos son aplicados ampliamente y a menudo producen resultados complementarios (Peterson et al. 2008). En este último punto, algunos autores sugieren que mientras GARP puede errar por un lado en la producción de resultados excesivamente amplios, Maxent a menudo se equivoca por el lado del sobreajuste, de tal forma que juntos proporcionan un contrapunto útil (Papes y Gaubert 2007). Estos últimos autores encontraron que los niveles de concordancia entre las predicciones de GARP y MaxEnt fueron bajas cuando el número de ocurrencia fue menor a 15, sugiriendo que MaxEnt extrapola mejor que GARP en el contexto del tamaño de muestra. Lo anterior probablemente indica el número mínimo necesario bajo el cual obtener modelos con buen poder predictivo.

A pesar de las altas exactitudes obtenidas, los resultados deben considerarse con cautela, ya que algunos autores consideran cambiar los parámetros de configuración por default a condiciones específicas de la especie para mejorar el desempeño de ambos modelos (Phillips y Dudik 2008; Anderson y Raza 2010; Shcheglovitova y Anderson 2013; Radosavljevic y Anderson 2014). En su forma más simple de configuración, algunos autores sugieren considerar el percentil 10 como regla de umbral, sin embargo, el valor empleado aquí (*minimum training presence*) y que confiamos produjo buenos resultados corresponde al valor más bajo de la predicción para cualquiera de los pixeles que corresponden a las localidades utilizadas en la calibración del modelo; por lo tanto, indica las condiciones ambientales menos adecuadas para las cuales se dispuso una localidad en el

conjunto de datos de calibración (Anderson y Raza 2010). De acuerdo a Shcheglovitova y Anderson (2013), cuando se cuenta con pocos registros, ésta representa una regla conservadora, poco probable de sobreestimar las zonas adecuadas para la especie (Allouche et al. 2006; Lemes y Loyola 2013).

Es importante mencionar que a pesar de los avances que la percepción remota ofrece para colectar datos que pueden ser adaptados para representar predictores más adecuados a la especie en cuestión; la mayoría de los estudios parecen utilizar sólo los datos que están al alcance de la mano y fallan al explicar la relevancia de los predictores seleccionados, excluyendo quizás otros indicadores ecológicos más importantes. El enfoque empleado aquí, es un enfoque novedoso que incorpora capas adicionales a las variables bioclimáticas construidas mediante el procesamiento de modelos digitales de elevación.

Como principal conclusión del presente trabajo, se propone que la trucha dorada mexicana encuentra las mejores condiciones para su distribución en altitudes superiores a los 2000 msnm, en corrientes de agua que corresponden a niveles de cauce de primer y segundo orden, principalmente.

Cabe mencionarse que, posiblemente por defectos en el diseño de muestreo, o bien por ser una zona donde hay mayor concentración de la especie, se cuenta con un mayor número de registros en la confluencia de las tres cuencas que forman parte del área de distribución de esta especie, incluyendo el sur de la cuenca del río Fuerte. Independientemente de lo anterior, la amplia coincidencia obtenida con las dos aproximaciones metodológicas, permite distinguir un territorio vasto donde existen posibilidades de encontrar nuevos registros de la especie, particularmente en la cuenca del río Culiacán.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue financiado por los proyecto CONABIO (JM058), CONACYT (CB-2010-01-152893). Para los muestreos en campo se contó con los permisos de pesca (SGPA/DGVS/02485/13, SGPA/DGVS/02968/14 y SGPA/DGVS/05052/15), expedidos por la Dirección General de Vida Silvestre de la SEMARNAT.

REFERENCIAS

Abadía-Cardoso, A., J.C. 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.

Allouche, O., A. Tsoar and R. Kadmon. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistics (TSS). *Journal of Applied Ecology*. 43(6): 1223-1232.

Anderson, R.P. 2003. Real vs. artefactual absences in species distributions: tests for *Oryzomys albigularis* (Rodentia: Muridae) in Venezuela. *Journal of Biogeography*. 30(4): 591-605.

Anderson, R.P., D. Lew and T. Peterson. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*. 162: 211-232.

Anderson, R.P. and A. Raza. 2010. The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of niche evolution: preliminary tests with montane rodents (genus *Nephelomys*) in Venezuela. *Journal of Biogeography*. 37: 1378-1393.

Araújo, M.B. and A.T. Peterson. 2012. Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*. 93(7): 1527-1539.

Barriga-Sosa, I.A., J.L. Arredondo-Figueroa, G. Ingle de la Mora y F.J. García-De León. 2006. Estrategias acuícolas para la conservación de truchas nativas: primeras experiencias. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.) *La trucha dorada mexicana*. Cap. 11.

Behnke, R.L. and J.R. Tomelleri. 2002. *Trout and salmon of North America*. The Free Press. Chicago, 359 p.

Camarena-Rosales, F., G. Ruiz-Campos, A. Varela-Romero y J. de la Rosa-Vélez. 2001. En busca de las truchas nativas de México. *Divulgare*. 9(36): 37-49.

Contreras-Balderas, S. and M.A. Escalante C. 1984. Distribution and known impacts of exotic fishes in Mexico. En: Courtenay W.R. and J.R. Stauffer (eds.). *Distribution, Biology and management of exotic fishes*. The John Hopkins University Press, Baltimore, MA. 102-130.

Escalante, M.A., F.J. García-De León, C.B. Dillman, A. de los Santos C., 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: 1063 – 1071.

Escalante, M.A., F.J. García-De León, C.B Dillman, A.B. De los Santos C., A. George, I.A. Barriga S. 2016. Introgresión genética de la trucha arcoíris exótica en la trucha dorada mexicana. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.) *La trucha dorada mexicana*. Cap. 10.

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.

Guisan, A. and N.E. Zimmermann. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*. 135(2): 147-186.

Guisan, A. and W. Thuiller. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*. 8(9): 993-1009.

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. Mcnyset, 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.

Hernández-Guzmán, R. 2006. Caracterización física de la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México a través de sistemas de información geográfica y modelos digitales

de elevación. *Tesis de Maestría.* Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. 112 p.

Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 25: 1965-1978.

IUCN. 2015. The IUCN Red list of threatened species. Version 2015-4. <www.iucnredlist.org>. Recuperado 17 Febrero 2016.

Lemes, P. and R.D. Loyola. 2013. Accommodating species climate forced dispersal and uncertainties in spatial conservation planning. *PLoS One*. 8(1): e54323.

Lin, W.T., W.C. Chou, D.Y. Lin, P.H. Huang and J.S Tsai. 2006. Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds. *Hydrological processes*. 20(2): 289-306.

Mayden, R. 2005. SGER: Biodiversity of native Mexican trout (Genus *Oncorhynchus* spp.) and the impending treat of their demise by the exotic rainbow trout *O. mykiss gairdneri* (Teleostei: Salmonidae). DEB 0240184. Final Report. 33 p. En línea: <http://bio.slu.edu/mayden/truchas/NSF_trout_final_report.pdf>.

Miller, R.R., W.L. Minckley y S.M. Norris. 2009. *Peces dulceacuícolas de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 545 p.

Morales, N.S., I.C. Fernández, B. Carrasco and C. Orchard. 2015. Combining niche modelling, land use change, and genetic information to assess the conservation status of *Pouteria splendens* populations in central Chile. *International Journal of Ecology*, ID 612194: 12 p.

Naoki, K., M.I. Gómez y R.P. López. 2006. Comparación de modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. *Ecología en Bolivia*. 41(1): 65-78.

Papes, M. and P. Gaubert. 2007. Modelling ecological niches from low numbers of occurrences: assessment of the conservation status of poorly known viverrids (Mammalia, Carnivora) across two continents. *Diversity and Distributions*. 13: 890-902.

Pearson, G.R., C.J. Raxworthy, M. Nakamura and A.T. Peterson. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*. 34: 102–117.

Peterson, A.T., M. Papes and M. Eaton. 2007. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. *Ecography*. 30: 550-560.

Peterson, A.T., M. Papes and J. Soberón. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*. 213: 63-72.

Peterson, A.T. and J. Soberón. 2012. Species distribution modeling and ecological niche modeling: getting the concepts right. *Natureza & Conservação*. 10(2): 102-107.

Phillips, S.J., R.P. Anderson and R.E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 190(3): 231-259.

Phillips, S.J. and M. Dudík. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 31(2): 161-175.

Proosdij, A.S.J. van, M.S.M. Sosef, J.J. Wieringa and N. Raes. 2015. Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution models. *Ecography*. 39(6): 542-552.

Radosavljevic, A. and R.P. Anderson. 2014. Making better MaxEnt models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. *Journal of Biogeography*. 41: 629-643.

Reyes-Valdéz, C.A., G. Ruiz-Campos, F. Camarena-Rosales and A. Varela-Romero. 2006. Diet composition of native trout (Salmonidae: *Oncorhynchus*) from the Sierra Madre Occidental, México. En: Lozano-Vilano M.D.L. and A.J. Contreras-Balderas (eds.). *Studies of North American desert fishes in Honor of E.P. (Phil) Pister, Conservationist*. México. Faculty of Biological Sciences, UANL. 125-137.

Ruiz-Luna, A., C.A. Berlanga-Robles, R. Hernández-Guzmán y M.A. Escalante-Sánchez. 2013. Modelación de la distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental y su relación con la estructura del paisaje adyacente. *Informe técnico final*. Proyecto CONABIO JM058. 49 p.

Scott, J.M., P.J. Heglund, M.L. Morrison, J.B. Haufler, M.G. Raphael, W.A. Wall and F.B. Samson. 2002. *Predicting species occurrences: Issues of accuracy and scale*. Island Press, Washington, EE.UU.

Shcheglovitova, M. and R.P. Anderson. 2013. Estimating optimal complexity for ecological niche models: A Jackknife approach for species with small samples sizes. *Ecological Modelling*. 269: 9-17.

Soberón, J. and M. Nakamura. 2009. Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 106(2): 19644-19650.

Soberón, J.M. 2010. Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. *Ecography*. 33(1): 159-167.

Stockwell, D.R.B. and D.P. Peters. 1999. The GARP modeling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographic Information Systems*. 13:143–158.

Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis for watershed geomorphology. *American Geophysical Union Transactions*. 38: 913-920.

Torres, R. y J.P. Jayat. 2010. Modelos predictivos de distribución para cuatro especies de mamíferos (Cingulata, Artiodactyla y Rodentia) típicas del Chaco en Argentina. *Mastozoología Neotropical*. 17(2): 335-352.