



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE BAJA
CALIFORNIA**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
OCEANOLÓGICAS**

**DOCTORADO EN MEDIO AMBIENTE Y
DESARROLLO**



**Evaluación de calidad de hábitat y de amenazas en la distribución
poblacional de la trucha *Oncorhynchus mykiss nelsoni* (Evermann) para la
generación de una propuesta de manejo integral de la cuenca del río Santo
Domingo, Baja California, México**

TESIS

Que para obtener el grado

DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta

IVÁN ALEJANDRO MEZA MATTY

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, ENERO DE 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS

DOCTORADO EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

Evaluación de calidad de hábitat y de amenazas en la distribución poblacional de la trucha *Oncorhynchus mykiss nelsoni* (Evermann) para la generación de una propuesta de manejo integral de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México

TESIS

Que para obtener el grado

DOCTOR EN CIENCIAS

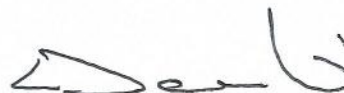
Presenta

IVÁN ALEJANDRO MEZA MATTY

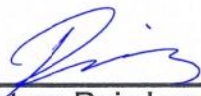
Aprobado por



Dr. Gorgonio Ruiz Campos
Co-Director de tesis



Dr. Luis Walter Daesslé Heuser
Co-Director de tesis



Dr. Arturo Ruiz Luna
Sinodal



Dra. Juana Claudia Leyva Aguilera
Sinodal



Dr. Álvaro López Lambráño
Sinodal

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, ENERO DE 2022

Resumen

Una propuesta de plan de manejo para la trucha endémica *Oncorhynchus mykiss nelsoni* en los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México fue generada con base en información documentada en las últimas tres décadas y la aplicación del modelo FPEIR (fuerzas motrices, presión, estado, impacto y respuesta). Esta subespecie catalogada en protección especial por la Norma Oficial Mexicana 059-2010 debido a su distribución confinada a los arroyos entre los 560 y 2,100 metros de altitud, enfrenta actualmente amenazas por diversas actividades antropogénicas y naturales (cambio climático). El estado actual de conservación poblacional de la trucha y sus hábitats fueron evaluados de manera integral mediante el análisis de la composición fisicoquímica del agua, el caudal de los arroyos, la distribución y abundancia poblacional, y los indicadores de la ecología de paisaje (unidades de hábitat, proporción de área por clase [CAP] y número de parches [PN]). Las fuerzas motrices, presión, impacto y respuesta se obtuvieron mediante un análisis documental, observaciones de campo, un análisis de amenazas y un análisis de riesgo de cada especie íctica exótica identificada cuenca abajo. La principal amenaza encontrada mediante el análisis de amenazas fue la reducción en los regímenes de flujo de los arroyos, principalmente debido al desvío de flujo del caudal para irrigación agrícola en los valles costeros de Camalú y Vicente Guerrero, y, en segundo lugar, el futuro declive poblacional de *O. m. nelsoni*, principalmente por el aumento de la temperatura en los arroyos por efecto del cambio climático global, lo cual promovería la dispersión de peces exóticos como *Lepomis cyanellus* y *Gambusia affinis*, hacia los sitios de menor elevación en la distribución de la trucha endémica en la cuenca del río Santo Domingo (arroyos San Antonio de Murillos, La Zanja y El Potrero), generando desplazamiento arroyo arriba de esta última. Las propuestas de manejo aportadas por esta investigación fueron la determinación del caudal ecológico en la cuenca del río Santo Domingo, la capacidad de carga ganadera para la conservación de la localidad La Grulla, y la propuesta de la localidad tipo (arroyo San Antonio de Murillos en Rancho San Antonio) sea considerada como un área de reguardo y conservación de germoplasma endémico de esta trucha bajacaliforniana, y finalmente, la proyección

de un plan de mitigación para el acondicionamiento de los hábitats en la localidad tipo ante el inminente calentamiento global.

Palabras clave: Manejo, conservación, *Oncorhynchus mykiss nelsoni*, amenazas antropogénicas, variabilidad de temperatura, modelo FPEIR, trucha endémica, pez exótico, unidad de hábitat, río Santo Domingo.

Dedicatoria

A Dios, por nunca abandonarme y siempre estar ahí cuando más lo he necesitado, darme la oportunidad de llegar hasta esta instancia y haber superado momentos tan difíciles en mi vida.

A mi mama Carolina, mi papa Juan y mis hermanas Carolina y Karina, por su amor, apoyo incondicional y siempre motivándome a seguir adelante ante cualquier circunstancia.

A ciertos miembros de mi familia, que siempre me han apoyado y creído en mis proyectos de vida que me he propuesto.

A mi comité de tesis, por su incondicional apoyo y disposición, que a pesar de la pandemia siempre estuvieron al pendiente de este trabajo, e hicieron de esto algo increíble, principalmente al Doctor Gorgonio, una persona a la cual admiro muchísimo, sin duda, soy afortunado de haberlo tenido como mi padre de la ciencia y principalmente como mi amigo desde mi paso por la maestría, ya casi 8 años de conocerlo, y siempre con esas ganas de hacer y disfrutar la ciencia, un ejemplo para todos los que lo conocemos.

A mis amigos, por haber estado ahí siempre apoyando, tanto en buenos o malos momentos, teniendo inolvidables experiencias.

A mis profesores, por su apoyo, amistad, tiempo dedicado y transmitirme toda esa sabiduría en el desarrollo de mi formación profesional.

A la Universidad Autónoma de Baja California, por ser mi casa de estudios durante la maestría y el doctorado, excelente universidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por su valioso apoyo económico y seguro médico mensual, los cuales sin ellos no se hubiera podido lograr este trabajo.

Agradecimientos

A Dios, por estar siempre ahí, esta vez acompañándome durante el transcurso del doctorado, dándome una vida de llena de aprendizajes y experiencias.

A mi madre Carolina, por el amor que me ha dado desde el primer momento, tener la fortaleza de salir adelante sin importar el pasado y haberme formado como un hombre de bien.

A mi padre Juan, por su cariño y amor, tener actualmente una excelente relación y ser un ejemplo para mí en muchos aspectos.

A mis hermanitas Karina y Carolina, que gracias a su amor me han enseñado a salir adelante y siempre tener su apoyo.

A mi director de tesis, padre de la ciencia durante éstos últimos 8 años y amigo, Dr. Gorgonio Ruiz Campos, por ser una excelente persona y un ejemplo a seguir para muchos que hemos tenido la fortuna de conocerlo. Mil gracias por siempre confiar en mí y darme la oportunidad de realizar este hermoso proyecto, su amistad, su apoyo incondicional, su total disposición y sobretodo su forma de transmitir el gusto por la ciencia, es admirable. También por invitarme a cada una de las salidas de campo, tanto de este proyecto como de otros proyectos muy interesantes, inolvidables experiencias vividas. Y por todas esas pláticas tan interesantes que tuvimos dentro o fuera de la escuela, compartiendo como lo dije en mi tesis de maestría, el gusto sobre los peces, futbol, entre muchísimas otras cosas. Siempre estaré agradecido con usted, por haber sido mi asesor y maestro en etapa de mi vida, sin lugar a dudas un gran investigador y amigo, esperando que esto no acabe aquí y sigamos colaborando en muchos otros proyectos.

Al Dr. Luis Walter Daesslé, por todo su apoyo, desde antes que entrara al doctorado, sin conocerme, recuerdo aquel día que me contacté con usted para platicarle sobre el proyecto que traíamos en mente el Doctor Gorgonio y yo, proponiéndole que formáramos un equipo con su persona, y su respuesta tan rápida y disponibilidad absoluta, diciendo que si aceptaba subirse al barco JeJeJe; en verdad aprecio

mucho en haber confiado en mí sin conocernos, no cualquiera sinceramente, y por supuesto a largo de estos años que duró el doctorado, siempre con una disposición impresionante, y con una actitud positiva y admirable, jamás lo vi enojado a pesar de que de repente había fricciones con otros maestros durante algunas clases que tuvimos, recuerda?, y por supuesto su apoyo y conocimientos brindados durante todo el manuscrito y el documento de tesis, muchas gracias doctor.

Al Dr. Arturo Ruiz Luna, por sus valiosas correcciones y sugerencias a lo largo de este proceso, tanto en el artículo que publicamos como en este documento, las cuales ayudaron significativamente en obtener estos productos finales y siempre mostrando una total disposición desde el primer momento en que lo invitamos a este proyecto. Por desgracia no tuve la oportunidad de conocerlo en persona, debido a que se tuvo que cancelar la estancia en Sinaloa por la pandemia, pero sin duda, espero pronto podamos conocernos en persona y seguir colaborando en nuevos proyectos.

Al Dr. Álvaro López Lambraño, por su ayuda durante esta etapa, ya sea de forma virtual o en persona, recordando que, de muy buena manera, me explicó toda esta parte importante de la hidrología, sin duda una aportación muy importante para la realización del artículo y la tesis, especialmente para el análisis del estado actual presente en los arroyos del área de estudio.

A la Dra. Juana Claudia Leyva Aguilera, una persona tan alegre, que transmite a flor de piel el gusto por la ciencia cada día y excelente profesora, conociéndola desde que empecé la maestría, ya casi 8 años Doctora, que rápido pasa el tiempo. Muchas gracias por ayudarnos con sus valiosas observaciones durante las reuniones de comité y en la parte del manejo, la cual fue fundamental en este proyecto. Como siempre mostrando una sonrisa y la pura buena vibra, en verdad un fuerte abrazo y gracias Doctora.

Al Dr. Faustino Camarena Rosales por su apoyo en los muestreos de trucha y caracterización de hábitat en el área de estudio.

A la Dra. Kathleen R. Matthews, por compartir datos históricos de temperatura de los arroyos de la sierra San Pedro Mártir (1996-2000) y por su apoyo en el manuscrito publicado en Journal of Limnology.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por su apoyo económico y de seguro médico, durante estos 36 meses que duró el programa de doctorado, con la cual pude solventar mis gastos satisfactoriamente, agradecido por siempre en haber confiado en mí y darme la oportunidad de llegar hasta aquí.

Al programa de Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, ubicado en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California, orgullo cimarrón de corazón, gracias por haberme elegido dentro de las seis personas que conformaron esta bonita generación 2018-2021, aún recuerdo como fue el ingreso, algo complicado ya que no había muchas becas disponibles, sin embargo, gracias a las personas que conforman la administración de las becas del posgrado, en especial al coordinador del programa, movieron mar y tierra para que los seis integrantes de ésta generación tuvieran ese excelente y necesario apoyo económico, así como también a la UABC en becarnos con la inscripción semestral, muchas gracias. Este programa sin duda me abrió bastante la mente a través de ese enfoque transdisciplinario que tiene, sumamente interesante y necesario en nuestras vidas para la solución de problemas.

A las autoridades del Parque Nacional sierra San Pedro Mártir, especialmente al Dr. Gonzalo de León Girón y personal asociado, por el apoyo logístico y facilidades de acceso a uno de los sitios de estudio.

A Indalecio Salazar por el apoyo en el transporte de equipo y acceso al rancho San Antonio, así como a Rolando Arce Pechis por el apoyo logístico en el transporte a caballo y traslado de los equipos en mulas a los sitios de estudio (La Grulla y rancho San Antonio).

Al Dr. Aldo A. Guevara Carrizales, un gran amigo, tanto dentro como fuera de la escuela, muchas gracias Doctor por incluirme en esas salidas de campo que eran de proyectos de sus estudiantes, dichas salidas me ayudaron a recabar una buena

parte de los datos analizados en esta investigación, y por supuesto su gran ayuda para la obtención de éstos.

A mis amigos de campo, Sergio, Karla, Ángel, Sayuri, Jonathan y Dulce, muchísimas gracias por su valiosa e invaluable ayuda para la obtención de datos, especialmente en la parte hidrológica y parámetros fisicoquímicos, así como también en darme la oportunidad de ayudarles en cada uno de sus interesantes proyectos, compartiendo gran cantidad de experiencias y aprendizajes juntos, un abrazote y el mejor de los éxitos para todos.

A todos mis estimados profesores que me impartieron clases durante esta etapa, Gorgonio, Walter, Ileana, Conchita y Georges, muchas gracias por sus enseñanzas brindadas, las cuales me dieron las bases para emprender el camino profesional en un futuro próximo.

A todos mis queridos amigos y compañeros de mi generación 2018-2021, Liliana, Carlos, Carolina, Humberto y Talía, por todas esas linda experiencias y convivios que vivimos juntos, en verdad les deseo lo mejor de lo mejor y que triunfen en todo lo que se propongan, un abrazote.

A todos mis amigos de la Ciudad de Ensenada, en especial, a mis amigos Tocayo Iván, Cali, Miguel, René e integrantes de los equipos de futbol en los que estuve durante éstos tres años, los cuales hicieron nuevamente de esta estancia algo bonito lleno de experiencias y aprendizajes.

Gracias a todos, los quiero.

Índice

Hoja de firmas	I
Resumen	II
Dedicatoria	IV
Agradecimientos.....	V
Índice.....	IX
Índice de Figuras.....	XIV
Índice de Tablas	XXII
1. Introducción.....	1
2. Antecedentes	3
2.1 <i>Oncorhynchus mykiss nelsoni</i>	3
2.1.1 Origen y taxonomía.....	3
2.1.2 Descripción morfológica.....	5
2.1.3 Distribución geográfica	8
2.1.4 Abundancia poblacional.....	10
2.1.5 Hábitat	11
2.1.6 Intervalos fisicoquímicos.....	11
2.1.7 Alimentación	12
2.1.8 Reproducción y fecundidad	12
2.1.9 Edad y crecimiento	13
2.1.10 Ámbito hogareño.....	13
2.1.11 Parásitos.....	13
2.2 Aspectos sociales de la sierra San Pedro Mártir.....	14
2.2.1 Históricos	14

2.2.2 Socioeconómicos y población humana.....	15
2.3 Impacto ambiental y amenazas.....	20
2.3.1 Casos de amenazas antropogénicas.....	22
2.3.2 Casos de amenazas naturales	24
2.3.3 Estudio de caso: trucha de San Pedro Mártir	26
3. Marco teórico.....	27
3.1 Fundamentos de Ecología del Paisaje	30
3.1.1 Conectividad	33
3.1.2 Fragmentación	33
3.1.3 Heterogeneidad	34
3.1.4 Metapoblación	34
3.1.5 Métricas del paisaje	37
4. Justificación.....	40
5. Objetivos de investigación.....	41
5.1. Objetivo general:	41
5.2 Objetivos específicos:	41
5.2.1 Determinar el estado de conservación de la trucha endémica <i>O. m. nelsoni</i> y sus hábitats, en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, México.	41
5.2.2 Identificar y dimensionar las Fuerzas Motrices, Presión, Impacto y Respuesta en las localidades de estudio.....	42
5.2.3 Construir y analizar el modelo FPEIR durante esta investigación.	42
5.2.4 Generar una propuesta de conservación y manejo integral de la cuenca del río Santo Domingo, ubicando como actor principal a la trucha endémica <i>O.</i> <i>m. nelsoni</i>	42
6. Área de estudio	44

6.1 Localización	44
6.2 Geomorfología	49
6.3 Hidrología.....	49
6.4 Climatología	52
6.5 Vegetación	53
6.6 Fauna de vertebrados	54
7. Metodología.....	56
7.1 Estado de conservación de la trucha endémica <i>O. m. nelsoni</i> y sus hábitats, en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, México.....	56
7.2 Fuerzas Motrices, Presión, Impacto y Respuesta	85
7.2.1 Análisis documental	87
7.2.2 Método “La planificación para conservación de los sitios” (Andrade et al., 1999).....	87
7.2.3 Análisis de riesgo (FISK)	89
7.3 Construir y analizar el modelo FPEIR durante esta investigación	92
7.4 Propuesta de conservación y manejo integral	94
7.4.1 Mapa con el índice EstPre	94
7.4.2 Actores potenciales.....	94
7.4.3 FODA.....	95
7.4.4 Estrategias de conservación	95
8. Resultados	96
8.1 Estado de la trucha de San Pedro Mártir y su hábitat	96
8.1.1 Temperatura de agua de los sitios de estudio	96
8.1.2 Composición fisicoquímica del agua.....	111
8.1.3 Variación del caudal en la cuenca del río Santo Domingo	130

8.1.4 Distribución y abundancia histórica y actual de la trucha <i>O. m. nelsoni</i>	140
8.1.5 Identificación de las unidades de hábitat (Evaluación del patrón de paisaje)	144
8.2 Fuerzas Motrices, Presión, Impacto y Respuesta	174
8.2.1 Análisis documental	174
8.2.2 Observaciones en campo	177
8.2.3 Análisis de amenazas	184
8.2.4 Análisis de riesgo (FISK)	190
8.3 Modelo FPEIR	192
8.4 Propuesta de conservación y manejo integral	195
8.4.1 Mapas con el índice EstPre	195
8.4.2 Actores potenciales	200
8.4.3 FODA	202
8.4.4 Estrategias de conservación	206
9. Discusión	219
9.1 Estado de conservación de la trucha endémica <i>Oncorhynchus mykiss nelsoni</i> y sus hábitats	219
9.1.1 Temperatura de agua de los sitios de estudio	219
9.1.2 Composición fisicoquímica del agua	221
9.1.3 Variación del caudal en la cuenca del río Santo Domingo	223
9.1.4 Distribución y abundancia histórica y actual de la trucha <i>O. m. nelsoni</i>	225
9.1.5 Identificación de las unidades de hábitat (Evaluación del patrón de paisaje)	227
9.2 Fuerzas Motrices, Presión, Impacto y Respuesta	232

9.2.1 Análisis documental	232
9.2.2 Observaciones en campo	235
9.2.3 Análisis de amenazas	237
9.2.4 Análisis de riesgo (FISK)	237
9.3 Construir y analizar el modelo FPEIR durante esta investigación.....	238
9.4 Propuesta de conservación y manejo integral	239
9.4.1 Mapa con el índice EstPre	239
9.4.2 Actores potenciales.....	239
9.4.3 FODA.....	240
9.4.4 Estrategias de conservación	240
10. Conclusiones.....	241
11. Bibliografía	245

Índice de Figuras

Figura 1. Trucha arcoíris de la sierra San Pedro Mártir, <i>Oncorhynchus mykiss nelsoni</i> , de la localidad tipo arroyo San Antonio de Murillos en Rancho San Antonio (Ruiz-Campos, 2017). Fotografía por Gorgonio Ruiz Campos.....	4
Figura 2. Espécimen de trucha de San Pedro Mártir (<i>Oncorhynchus mykiss nelsoni</i>) en coloración reproductiva. Fotografía por Gorgonio Ruiz-Campos.....	7
Figura 3. Localidades de distribución actual de la trucha de San Pedro Mártir (<i>O. m. nelsoni</i>). (1) río San Rafael, en Rancho Mike's Sky; (2) río San Rafael, entre rancho Mike's Sky y rancho Garet; (3) río San Rafael, en rancho Garet; (4) arroyo Valladares, en rancho (Nuevo) Valladares; (5) arroyo Valladares, en represo cerca del rancho (Viejo) Valladares; (6) arroyo Valladares, en rancho (Viejo) Valladares (mina abandonada); (7) arroyo El Potrero, en rancho El Potrero; (8) arroyo La Zanja, cerca de la confluencia con el arroyo San Antonio; (9) arroyo San Antonio de Murillos, en rancho San Antonio (localidad tipo); (10) arroyo San Antonio, y (11) arroyo La Grulla, en La Grulla. Fuente: Ruiz-Campos et al., 2014.....	9
Figura 4. Ranchos, poblados y centros de población en el área de influencia del Parque Nacional San Pedro Mártir. Figura tomada de CONANP (2009).	18
Figura 5. Modelo Fuerzas motrices-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (Fuente: OCDE, 2007).....	28
Figura 6. Elementos del paisaje basados en Forman y Gordon (1981).	31
Figura 7. Estructuras metapoblacionales: a) Clásica de Levins, b) Isla–Continente y Fuente–Sumidero, c) Parchada, y d) Desequilibrio. Las flechas indican el desplazamiento poblacional, los círculos claros indican parches disponibles y los círculos oscuros las poblaciones locales. Tomado de Flores-Galván, 2013.	36
Figura 8. Área de estudio: Localidades “La Grulla”, “El Potrero” y “San Antonio de Murillos (Localidad tipo)” en la cuenca del río Santo Domingo con sus principales y secundarias redes hidrográficas. Baja California, México.	45
Figura 9. Imágenes del sitio de muestreo en el arroyo La Grulla, Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. (Fotografías: A, Iván Alejandro Meza Matty; y B, Gorgonio Ruiz-Campos).....	46

Figura 10. Imágenes del sitio de muestreo en el arroyo El Potrero, Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México (Fotografías: Iván Alejandro Meza Matty).	47
Figura 11. Imágenes del sitio de muestreo en el arroyo San Antonio de Murillos, Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México (localidad tipo de la trucha <i>O. mykiss nelsoni</i>). Fotografías: A, Ivan A. Meza Matty; y B, Gorgonio Ruiz-Campos).	48
Figura 12. Delimitación de cuencas e hidrología superficial de la vertiente occidental de la sierra San Pedro Mártir. Tomado de Ruiz-Campos (2017).....	51
Figura 13. Indicadores de Estado evaluados con su respectivo método y el esperado producto obtenido de cada uno de ellos en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, México.....	57
Figura 14. Termógrafo sumergible (HOBO Pendant, Modelo UA-002-08) utilizado para el registro de temperatura a intervalos de una hora, en un sitio del arroyo San Rafael, sierra San Pedro Mártir, Baja California, México.	59
Figura 15. Colocación de los sensores de temperatura de agua HOBO en las diferentes localidades del área de estudio en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, México.....	59
Figura 16. Equipo multianalizador Hydrolab Scout 2 utilizado en cada una de las localidades de estudio en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.	64
Figura 17. Manejo de las muestras de agua en esta investigación, desde la recolección hasta el preparamiento de las mismas antes de su procesamiento en laboratorio.	66
Figura 18. Diagrama de Stiff, representando una muestra de agua en la localidad “La Zanja” recolectada el día 26 de junio de 2019 (elaborado con el programa AquaChem 3.70).	68
Figura 19. Diagrama de Piper, representando una muestra de agua de tipo bicarbonatada cálcica. Intersecciones muestran una composición de agua bicarbonatada cálcica (Gilabert-Alarcón, 2018).....	69

Figura 20. Mediciones morfológicas y morfométricas realizadas en cada unidad de hábitat identificada en las localidades de estudio de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.	71
Figura 21. A) Flexómetro y B) correntómetro utilizados en las localidades de estudio de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.	72
Figura 22. Equipo de electropesca utilizado para la captura de trucha de San Pedro Mártir en el sitio de arroyo El Potrero, Baja California, México.....	75
Figura 23. Etapas en el proceso de captura y obtención de datos biométricos de individuos de la trucha arcoíris de San Pedro Mártir, en el sitio de arroyo El Potrero, Baja California, México. Fotografías por Iván Alejandro Meza Matty (1, 4 y 6) y Gorgonio Ruiz-Campos (2, 3 y 5).	77
Figura 24. Tipos de unidades de hábitat donde habita la trucha endémica <i>Oncorhynchus mykiss nelsoni</i> en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México. A) PEC = Poza de erosión central, B) PES = Poza de escalón, C) PCC = Poza de canal de confluencia, D) PEL = Poza de erosión lateral, E) CFL = Corriente de flujo laminar, F) COR = Corriente, G) COE= Corriente escalonada.	81
Figura 25. Indicadores de Fuerzas motrices, Presión, Impacto y Respuesta evaluados con su respectivo método y el esperado producto obtenido de cada uno de ellos analizados en el área de estudio.	86
Figura 26. Diseño de la herramienta FISK, utilizada para realizar el análisis de riesgo en esta investigación.....	90
Figura 27. Esquema de marco de referencia Fuerzas motrices-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (FPEIR) (Smeets y Wetering, 1999).	93
Figura 28. Temperatura del agua registrada con un termógrafo dual en el arroyo La Grulla, SSPM, Baja California (2,080 msnm), (A) Temperatura a intervalos de 1 hora de agosto de 2014 a abril de 2019. (B) Temperatura promedio diaria de junio 1999 a abril 2019.....	97
Figura 29. Temperatura del agua registrada con un termógrafo dual en el arroyo San Rafael, sierra San Pedro Mártir, Baja California (1,220 msnm). (A) Temperatura a intervalos de 1 h de febrero 2014 a febrero de 2015. (B) Temperatura promedio diaria de mayo de 1996 a febrero de 2015.....	99

Figura 30. Temperatura del agua registrada con un termógrafo dual en el arroyo San Antonio de Murillos, SSPM, Baja California (553 msnm). (A) Temperatura a intervalos de 1 hora de mayo de 2014 a abril de 2015. (B) Temperatura promedio diaria de mayo de 2014 a abril de 2015.	101
Figura 31. Temperaturas pronosticadas para los años 2025 y 2050 por los modelos climáticos GFDL R30, HadCM3 y Mote, para intervalos de 1 h en los arroyos La Grulla (A), San Rafael (B) y San Antonio de Murillos (C), sierra San Pedro Mártir, Baja California, México.....	104
Figura 32. Temperaturas del agua registradas a intervalos de 1 hora para el arroyo San Rafael, sierra San Pedro Mártir, Baja California, durante el día 28 de julio de los años 1993 y 2014, y aquellas pronosticadas con el modelo climático Mote para ese mismo sitio y día del año en 2050.	105
Figura 33. Altitud mínima donde se expresarían valores de temperatura del agua promedio diarias inferiores a 28 °C, en las cuencas de los ríos Santo Domingo, San Telmo y San Rafael, según lo predicho por el modelo Mote para los años 2025 (A) y 2050 (B).....	108
Figura 34. Altitud mínima donde se expresarían valores de temperatura del agua por hora inferiores a 28 °C, en las cuencas de los ríos Santo Domingo, San Telmo y San Rafael, según lo predicho por el modelo Mote para los años 2025 (A) y 2050 (B).	110
Figura 35. Medición de variables fisicoquímicas del agua con un equipo multianalizador Hydrolab Scout 2 (Hydrolab Co., Austin, Texas) en el sitio del arroyo El Potrero, perteneciente a la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, 4 de mayo de 2019.	113
Figura 36. Toma de muestras de agua en la localidad “El Potrero” perteneciente a la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 04 de mayo de 2019.	115
Figura 37. Diagramas de Stiff de las localidades de estudio para cada una de las muestras de agua durante el periodo abril-junio 2019, localizadas en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.	125

Figura 38. Composición isotópica de oxígeno e hidrógeno en H ₂ O pertenecientes a las localidades de estudio ubicadas en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.....	127
Figura 39. Diagrama de Piper de las aguas colectadas durante el periodo abril-junio 2019, en La Grulla, El Potrero, San Antonio, La Zanja y San Antonio de Murillos, localizadas en la cuenca del río Santo Domingo.....	129
Figura 40. Valores históricos y actuales de descarga del arroyo “La Grulla” perteneciente a la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.	133
Figura 41. Valores históricos y actuales de descarga del arroyo “El Potrero” perteneciente a la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.	135
Figura 42. Valores históricos y actuales de descarga del arroyo “San Antonio de Murillos” perteneciente a la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.	137
Figura 43. Imágenes tomadas en la localidad de La Grulla en diferentes años en un lapso de 28 años: A) agosto de 1990. B) septiembre de 2014, C) agosto de 2015, D) septiembre de 2016, E) septiembre de 2018, y F) noviembre de 2018. Fotografías por Gorgonio Ruiz-Campos.....	139
Figura 44. Densidad poblacional de la trucha endémica (<i>O. m. nelsoni</i>) en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, durante el período 1995-2019.	143
Figura 45. Transecto muestreado en el sitio del arroyo La Grulla, Baja California, México.	145
Figura 46. Transecto muestreado en el sitio del arroyo El Potrero, Baja California, México.	146
Figura 47. Transecto muestreado en el sitio del arroyo San Antonio de Murillos, Baja California, México.	147
Figura 48. Clasificación de unidades de hábitat en los sitios de arroyo de estudio en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. A) Poza de erosión central (PEC), B) Corriente de flujo laminar (CFL), C) Poza en escalón (PES), D) Corriente (COR), E) Poza de canal de confluencia (PCC), F) Poza	

de erosión lateral (PEL) y G) Corriente en Escalón (COE). Fotografías por Gorgonio Ruiz-Campos.....	151
Figura 49. Distribución metapoblacional de la trucha <i>O. m. nelsoni</i> , en el sitio de muestreo del arroyo San Antonio de Murillos”, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, durante abril de 2015.	155
Figura 50. Distribución metapoblacional de la trucha <i>O. m. nelsoni</i> , en el sitio de muestreo del arroyo La Grulla, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, durante abril de 2017.	156
Figura 51. Distribución metapoblacional de la trucha <i>O. m. nelsoni</i> , en el sitio de muestreo del arroyo El Potrero, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, durante mayo de 2019.	157
Figura 52. Caracterización del paisaje actual en el sitio de muestreo del arroyo La Grulla, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 15 de abril de 2019. A) Imagen in situ tomada con Dron (Fotografía: Iván Alejandro Meza Matty. B) Mapa generado en el Sistema de Información Geográfica Quantum GIS versión 3.8.1. PEC = Poza de erosión central, COE = Corriente escalonada.....	159
Figura 53. Mapa esquemático del área estimada por tipo de unidad de hábitat en el sitio de muestreo del arroyo La Grulla, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 15 de abril de 2019. PEC = Poza de erosión central, COE = Corriente escalonada.	160
Figura 54. Caracterización del paisaje actual en el sitio de muestreo del arroyo El Potrero, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 4 de mayo de 2019. A) Imagen in situ tomada con Dron (Fotografía: Iván Alejandro Meza Matty. B) Mapa generado en el Sistema de Información Geográfica Quantum GIS versión 3.8.1. PES = Poza de escalón, COR = Corriente, PCC = Poza de canal de confluencia, PEL = Poza de erosión lateral.....	161
Figura 55. Mapa esquemático del área estimada por tipo de unidad de hábitat en el sitio de muestreo del arroyo El Potrero, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 4 de mayo de 2019. PES = Poza de escalón, COR = Corriente, PCC = Poza de canal de confluencia, PEL = Poza de erosión lateral.....	162

Figura 56. Caracterización del paisaje actual en el sitio de muestreo del arroyo San Antonio de Murillos, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 26 de junio de 2019. A) Imagen in situ tomada con Dron (Fotografía: Iván Alejandro Meza Matty. B) Mapa generado en el Sistema de Información Geográfica Quantum GIS versión 3.8.1. COR= Corriente, PEL = Poza de erosión lateral, CFL = Corriente de flujo laminar, PEC = Poza de erosión central, PES = Poza de escalón.	163
Figura 57. Mapa esquemático del área estimada por tipo de unidad de hábitat en el sitio de muestreo del arroyo San Antonio de Murillos, localizado en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 26 de junio de 2019. COR= Corriente, PEL = Poza de erosión lateral, CFL = Corriente de flujo laminar, PEC = Poza de erosión central, PES = Poza de escalón.	164
Figura 58. Porcentaje de área cubierta por tipo de hábitat en los sitios de muestreo de los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California. Tipos de unidades de hábitat: PEC = Poza de erosión central, CFL = Corriente de flujo laminar, PES = Poza de escalón, COR = Corriente, PCC = Poza de canal de confluencia, PEL = Poza de erosión lateral, COE = Corriente escalonada.	167
Figura 59. Distribución potencial del pez endémico <i>Oncorhynchus mykiss nelsoni</i> en el sitio de muestreo del arroyo La Grulla, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 29 de abril de 2017.....	169
Figura 60. Distribución potencial del pez endémico <i>Oncorhynchus mykiss nelsoni</i> en el sitio de muestreo del arroyo El Potrero, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 4 de mayo de 2019.....	170
Figura 61. Distribución potencial del pez endémico <i>Oncorhynchus mykiss nelsoni</i> en el sitio de muestreo del arroyo San Antonio de Murillos, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 26 de junio de 2019.	171
Figura 62. Red de tuberías detectadas el 25 de junio de 2019 en la parte media de la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, México.	178
Figura 63. Actividad ganadera en septiembre de 2018 en la pradera de La Grulla, adyacente al arroyo de estudio, donde se aprecia el efecto de pastoreo intensivo y el pisoteo del suelo. Fotografía Iván Alejandro Meza Matty.	180

Figura 64. Alteración de la planicie de inundación y bancos de una sección de arroyo por efecto de pisoteo del ganado vacuno en la sierra San Pedro Mártir, Baja California, México, en un segmento del arroyo de la localidad La Grulla en septiembre de 2018. Fotografía Gorgonio Ruiz Campos.	181
Figura 65. Imágenes de la ciénaga La Grulla en diferentes años, mostrando los cambios en la densidad y cobertura del pastizal sin actividad de pastoreo (A: abril 2017, y C: abril 2019) y con actividad de pastoreo (B: septiembre 2018) por ganado. Fotografías Aldo A. Guevara Carrizales (A) Iván Alejandro Meza Matty y Gorgonio Ruíz Campos (B y C).	183
Figura 66. Clasificación del Índice EstPre en el sitio de San Antonio de Murillos, localizado en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.	197
Figura 67. Clasificación del Índice EstPre en el sitio de El Potrero, localizado en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.	198
Figura 68. Clasificación del Índice EstPre en el sitio de La Grulla, localizado en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.	199

Índice de Tablas

Tabla 1. Localidades del área de influencia al Parque Nacional San Pedro Mártir.	19
Tabla 2. Descripción de los tipos de hábitat registrados y las siglas utilizadas para su identificación en las localidades de estudio en la cuenca del río Santo Domingo de acuerdo a la guía de campo para la tipificación de hábitat de salmónidos (USDA-USFS, 1990).....	80
Tabla 3. Número de horas acumuladas con temperaturas del agua ≥ 28 °C en tres sitios de la sierra San Pedro Mártir, Baja California, México, basado en proyecciones con tres modelos diferentes para los años 2025 y 2050.	106
Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos del agua de los arroyos La Grulla, El Potrero y San Antonio de Murillos, localizados en la cuenca del río Santo Domingo. Los muestreos analizados fueron realizados en el periodo 1989-2019.	112
Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos pertenecientes a los puntos de muestreo de agua en diferentes localidades pertenecientes a la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.....	117
Tabla 6. Concentración de aniones mayoritarios en muestras de agua obtenidas de los arroyos La Grulla, El Potrero, San Antonio, La Zanja y San Antonio de Murillos, en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir.....	119
Tabla 7. Principales cationes (Na, Mg, K y Ca) pertenecientes a las muestras de agua obtenidas de los arroyos La Grulla, El Potrero, San Antonio, La Zanja y San Antonio de Murillos, localizados en la cuenca del río Santo Domingo. Los muestreos fueron realizados en el año 2019.	121
Tabla 8. Valores permisibles por la NOM-127-SSA1-1994 y aquellos obtenidos en esta investigación para los principales cationes y aniones pertenecientes a las muestras de agua obtenidas de los arroyos La Grulla, El Potrero, San Antonio, La Zanja y San Antonio de Murillos, localizados en la cuenca del río Santo Domingo. Los muestreos fueron realizados en el año 2019.....	123
Tabla 9. Características fisiográficas e hidrométricas históricas y recientes de los arroyos de distribución de la trucha <i>O. m. nelsoni</i> , en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California. Clasificar cuales son recientes y cuales son históricas (las	

recientes deben ser aquellas de 2014 a 2019) y las históricas aquellas de 1905 a 1992.	131
Tabla 10. Captura-por-unidad-esfuerzo (CPUE) de la trucha endémica (<i>O. m. nelsoni</i>) para una sección de arroyo de 200 metros de longitud en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, durante el período 1995-2019.	141
Tabla 11. Unidades de hábitats identificadas en cada una de las localidades de estudio (La Grulla, El Potrero y San Antonio de Murillos), localizadas en la cuenca del río Santo Domingo durante el año 2019. PEC = Poza de erosión central, CFL = Corriente de flujo laminar, PES = Poza de escalón, COR = Corriente, PCC = Poza de canal de confluencia, PEL = Poza de erosión lateral, COE= Corriente escalonada.	149
Tabla 12. Número de individuos de <i>O. m. nelsoni</i> por unidad de hábitat en los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México. *= No se identificó esta unidad de hábitat en esa fecha. Poza de erosión central (PEC), Corriente de flujo laminar (CFL), Poza en escalón (PES), Corriente (COR), Poza de canal de confluencia (PCC), Poza de erosión lateral (PEL) y Corriente en Escalón (COE).	153
Tabla 13. Número de parches de cada hábitat y la proporción de área por tipo de hábitat en los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California. Tipos de unidades de hábitat: PEC = Poza de erosión central, CFL = Corriente de flujo laminar, PES = Poza de escalón, COR = Corriente, PCC = Poza de canal de confluencia, PEL = Poza de erosión lateral, COE = Corriente escalonada.	166
Tabla 14. Número de parches con tipo de distribución potencial de <i>Oncorhynchus mykiss nelsoni</i> , pertenecientes a los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California.	169
Tabla 15. Coberturas y resultado de las métricas PROX y ENN para los sitios de arroyo muestreados en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, durante el periodo 2017-2019. Tipos de unidades de hábitat: PEC = Poza de erosión central, CFL = Corriente de flujo laminar, PES = Poza de escalón, COR= Corriente, PCC =	

Poza de canal de confluencia, PEL = Poza de erosión lateral, COE = Corriente escalonada.	173
Tabla 16. Fuerzas Motrices, Presión, Impacto y Respuesta identificadas en trabajos previos en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.	175
Tabla 17. Valores asignados para arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, durante el periodo 1994-2019.	185
Tabla 18. Puntuaciones de los Impactos y Fuentes en los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, durante el periodo 1994-2019.	187
Tabla 19. Valores obtenidos para los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, durante el periodo 1994-2019.	189
Tabla 20. Puntuación y niveles de riesgo para las diferentes especies exóticas ubicadas en la cuenca baja del río Santo Domingo, Baja California, México.	191
Tabla 21. Modelo de fuerzas Motrices-Presión-Estado-Impacto-Respuesta de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México. Elaboración propia.	192
Tabla 22. Unidades correspondientes a la clasificación de prioridad obtenida por el índice EstPre, durante el periodo 2014-2019 en las localidades de estudio de la cuenca del río Santo Domingo, Ensenada, Baja California, México.	196
Tabla 23. Actores potenciales identificados para la realización de la propuesta de manejo del pez endémico <i>O. m. nelsoni</i> en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México. SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), INE (Instituto Nacional de Ecología), CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas), CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), UABC (Universidad Autónoma de Baja California), CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada), SIMAC (Sociedad Ictiológica Mexicana A.C.), UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México), AZFGD (Arizona Game and Fish Department), CDFG (California Department of Fish and Game), FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), IUCN (International Union for Conservation of Nature), WWF (World Wildlife Fund) y DFC (Desert Fishes Council).	201

Tabla 24. Análisis FODA para las localidades de estudio en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Ensenada, Baja California, México.	203
Tabla 25. Propuestas de manejo para los impactos a nivel localidad en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Ensenada, Baja California, México.	207
Tabla 26. Propuestas de manejo para los impactos a nivel sistema en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Ensenada, Baja California, México.	215

1. Introducción

La trucha arcoíris *Oncorhynchus mykiss nelsoni* (Evermann, 1908), es una subespecie endémica de los arroyos de la pendiente occidental de la sierra San Pedro Mártir, en Baja California, México (Ruiz-Campos y Pister, 1995; Ruiz-Campos, 2017). Esta trucha habita desde los 553 a los 2,080 metros sobre el nivel del mar, en hábitats de corriente y pozas con temperaturas que no superan, en promedio, los 25 °C en el verano (Ruiz-Campos, 1993, 2017; Meza-Matty et al., 2021).

Esta trucha bajacaliforniana es considerada la subespecie más austral de la serie costera de Norteamérica (Behnke, 2002), y posiblemente representa una de las poblaciones genéticamente más conservadas de trucha arcoíris en el suroeste de Norteamérica (Abadía-Cardoso et al., 2016). Debido a su distribución confinada y baja abundancia, esta subespecie está ubicada en la categoría de preocupación especial por el Comité de Peces en Peligro de Extinción de la American Fisheries Society (Jelks et al., 2008) y en Protección Especial por el gobierno mexicano (NOM-059-ECOL-2010).

Actualmente, esta trucha endémica enfrenta una serie de amenazas por actividades antropogénicas dentro de la sierra San Pedro Mártir o en áreas contiguas, como son la ganadería extensiva, minería, extracción de agua, desviación de los flujos para irrigación agrícola, capturas ilegales furtivas, entre otras (Ruiz-Campos, 2017), además del efecto potencial que originará el cambio climático global en su distribución altitudinal (Meza-Matty et al., 2021). Aunado a lo anterior, se suma la presencia de especies exóticas tolerantes a este cambio térmico, provenientes por dispersión desde la parte baja de la cuenca (Ruiz-Campos et al., 2014a).

De continuar las amenazas ya mencionadas en los hábitats de esta trucha endémica, afectarán su densidad, estructura y distribución poblacional en un período de corto y mediano plazo.

Por ello, se hace necesario generar un plan de manejo y conservación mediante la integración de la información que ha sido generada durante las últimas tres décadas

con el propósito de caracterizar la distribución y abundancia poblacional, sus hábitats, incluyendo la variación de la temperatura, los posibles efectos del cambio climático global y las amenazas que enfrentan sus poblaciones y hábitats por las diversas actividades antropogénicas dentro y fuera de la cuenca del río Santo Domingo.

2. Antecedentes

2.1 *Oncorhynchus mykiss nelsoni*

2.1.1 Origen y taxonomía

La trucha de San Pedro Mártir, *O. m. nelsoni* (Fig. 1), fue la primera trucha mexicana conocida por la ciencia (Evermann, 1908). El naturalista Edward. W. Nelson recolectó ejemplares de esta trucha en la localidad de Rancho San Antonio (cuenca del río Santo Domingo), durante sus recorridos exploratorios en la península de Baja California (julio de 1905). Estos ejemplares fueron turnados al Dr. Barton Warren Evermann para su identificación taxonómica, mismo que la denominó *Salmo nelsoni*, en honor a su recolector original (Ruiz-Campos, 2017).

El origen evolutivo y biogeográfico de la trucha arcoíris de San Pedro Mártir tiene diversas opiniones al respecto. Evermann (1908) y Snyder (1926) concuerdan que esta trucha posee características típicas de los miembros de la serie arcoíris, aunque difieren con respecto a su origen. Por su parte, Evermann (1908) indicó una mayor relación con la trucha arcoíris del río Kern, California (*O. mykiss gilberti*), aunque Snyder (1926) señaló una mayor afinidad con la trucha arcoíris costera de California (*O. mykiss irideus*).

Diversos autores (e.g., Benhke, 2002; Hubbs, 1946; Needham y Gard, 1959; Smith, 1984, 1991) coinciden sobre el posible origen evolutivo de la trucha de San Pedro Mártir, argumentando que se trata de una población aislada derivada de la trucha arcoíris costera. En este sentido, Ruiz-Campos et al. (2003) determinaron a nivel morfométrico 17 caracteres que distingue a esta subespecie de trucha arcoíris de las truchas nativas de la Sierra Madre Occidental, en la cual se incluye a la trucha dorada mexicana. Así mismo, Camarena-Rosales et al. (2008) mediante estudios genético-moleculares de las truchas nativas del noroeste de México, detectaron la presencia de un haplotipo exclusivo en la trucha arcoíris de San Pedro Mártir que la distingue de la trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*), y otras truchas del género *Oncorhynchus*, aún no descritas, de la Sierra Madre Occidental.



Figura 1. Trucha arcoíris de la sierra San Pedro Mártir, *Oncorhynchus mykiss nelsoni*, de la localidad tipo arroyo San Antonio de Murillos en Rancho San Antonio (Ruiz-Campos, 2017). Fotografía por Gorgonio Ruiz Campos.

2.1.2 Descripción morfológica

Basada en la descripción original de Evermann (1908), esta trucha se caracteriza por lo siguiente: cabeza 3.75 en longitud a la base de la aleta caudal (longitud patrón (LP)); altura del cuerpo 4 veces en LP; diámetro del ojo, hocico (distancia preorbital), longitud maxilar y longitud mandibular, 4, 4, 2.1 y 1.8 veces en la longitud cefálica, respectivamente. Aleta dorsal y aleta anal con 10 radios cada una; escamas en la línea lateral de 127 a 143. Contorno dorsal y ventral poco arqueado; cabeza corta, hocico corto y obtuso; mandíbula inferior ligeramente incluida; maxilarmente corta, casi recta, poco expandida en la punta, escasamente alcanzando la vertical desde el margen posterior de la órbita ocular; dientes de mandíbulas y maxilares en una hilera simple, mientras que aquéllos del vómer y lengua, en una hilera doble y bien desarrollados; branquiespinas 3+9 o 4+8, cortas, obtusas y planas, las cuales caben 3 veces en el diámetro ocular; la altura mínima del pedúnculo cabe 2.3 veces en la longitud cefálica (Fig. 2).

Respecto a las aletas, la aleta pectoral es corta y redondeada, su longitud es 1.5 veces en la longitud cefálica; origen de la aleta dorsal situada en posición intermedia entre la punta del hocico y la base de la aleta caudal; base de la aleta dorsal igual a la longitud del radio más grande, la cual cabe 2 veces en la longitud cefálica; margen distal de la aleta dorsal casi recto; base de la aleta anal más corta que su radio más largo; aleta caudal furcada con los lóbulos obtusamente puntiagudos, su longitud 1.4 veces en la longitud cefálica; aletas pélvicas cortas, no alcanzan el ano; la longitud de las aletas pélvicas cabe 1.8 veces en la longitud cefálica. Maxilarmente, los machos poseen una mandíbula más grande que se torna ligeramente curvada durante la época reproductiva; el hocico o rostro es más largo y puntiagudo en machos y más corto y redondeado en hembras. En hembras el diámetro del ojo es mayor que la distancia preorbital (rostro), mientras que en los machos el diámetro ocular es casi igual o menor en tamaño que el rostro (Evermann, 1908)

Respecto a su coloración, las aletas son pareadas y de color naranja brillante. Aleta pélvica es de color amarillento y la aleta anal posee manchas negras de formas

ovaladas y circulares de distintos tamaños. Una línea lateral bien desarrollada de color rosa o rojo y con algunas manchas circulares negras en la región ventral (Ruiz-Campos et al., 2003; Aguilar-Juárez, 2010).

Esta subespecie llega a poseer en el medio natural una longitud total y edad máxima de 290 mm y cuatro años, respectivamente (Ruiz-Campos et al., 1997; Ruiz-Campos, 2017).



Figura 2. Espécimen de trucha de San Pedro Mártir (*Oncorhynchus mykiss nelsoni*) en coloración reproductiva. Fotografía por Gorgonio Ruiz-Campos.

2.1.3 Distribución geográfica

Actualmente existen registros de especímenes de la trucha endémica *O. m. nelsoni* en los arroyos de la pendiente occidental de la sierra San Pedro Mártir, que de acuerdo a Ruiz-Campos (2017) se ubican en altitudes entre 553 y 2,080 msnm (Fig. 3). En un principio su distribución original se restringió a una sección de 24.2 km del arroyo Santo Domingo (= San Antonio) y arroyo La Zanja, en las proximidades del rancho San Antonio (Evermann, 1908; Ruiz-Campos y Pister, 1995; Ruiz-Campos, 2017).

La formación de una alta cascada, aproximadamente a 8.1 km arroyo arriba del rancho San Antonio es considerada como una barrera física, la cual ha provocado que no se dé una dispersión natural de esta trucha aguas más arriba, por lo cual entre los años 1929 y 1941, el naturalista Charles Edward Utt procedió a realizar translocaciones de la localidad tipo (San Antonio), a los arroyos La Misión o San Pedro (año 1929), La Zanja (años 1935 y 1936); Valladares (años 1937 y 1941); La Grulla (años 1935 y 1936); y San Rafael (años 1938 y 1939); con el fin de ampliar su distribución, las cuales fueron exitosas ya que en la actualidad existen poblaciones establecidas en todas estas localidades (Ruiz-Campos y Pister, 1995; Ruiz-Campos et al., 2014; Ruiz-Campos, 2017).

Villarreal-Zazueta (2012) evaluó dos poblaciones locales de la trucha de San Pedro Mártir, con el fin de identificar el estatus de conservación y de salud genética de esta subespecie endémica, encontrando que la estructura poblacional es estable. Así mismo, corroboró que las distancias genéticas entre las poblaciones fueron bajas, lo cual confirma el origen de traslocación para las poblaciones establecidas en los arroyos de La Grulla, San Rafael y El Potrero, a partir de la población fuente del arroyo San Antonio (localidad tipo) entre 1929 y 1941 (Ruiz-Campos y Pister, 1995).

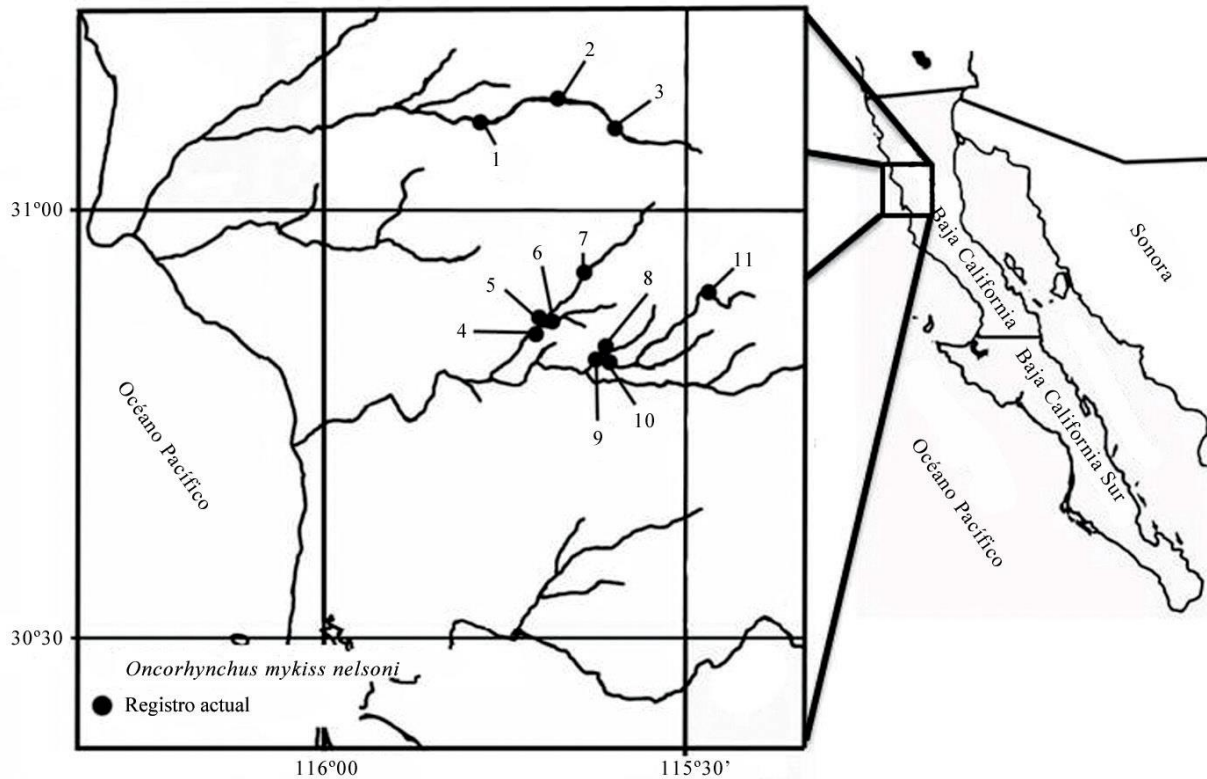


Figura 3. Localidades de distribución actual de la trucha de San Pedro Mártir (*O. m. nelsoni*). (1) río San Rafael, en Rancho Mike's Sky; (2) río San Rafael, entre rancho Mike's Sky y rancho Gareth; (3) río San Rafael, en rancho Gareth; (4) arroyo Valladares, en rancho (Nuevo) Valladares; (5) arroyo Valladares, en represo cerca del rancho (Viejo) Valladares; (6) arroyo Valladares, en rancho (Viejo) Valladares (mina abandonada); (7) arroyo El Potrero, en rancho El Potrero; (8) arroyo La Zanja, cerca de la confluencia con el arroyo San Antonio; (9) arroyo San Antonio de Murillos, en rancho San Antonio (localidad tipo); (10) arroyo San Antonio, y (11) arroyo La Grulla, en La Grulla. Fuente: Ruiz-Campos et al., 2014.

2.1.4 Abundancia poblacional

La trucha de San Pedro Mártir (*O. m. nelsoni*) ha experimentado fluctuaciones en su densidad poblacional a través de los últimos 30 años, debido a cambios en los niveles de flujo, reducción de hábitat por azolvamiento y mortandad de individuos por vertimiento de cenizas derivados de incendios forestales (Ruiz-Campos, 2017). La evaluación de la abundancia poblacional de esta trucha en el arroyo San Rafael en el periodo de 1987 a 1994 demostró valores relativamente estables en los primeros tres años (20-98 individuos/200 m de arroyo) pero a partir de 1991, después de un incendio forestal, la densidad disminuyó notablemente (0-26 individuos/200 m de arroyo). Después de tres años, la población se recuperó, y en los 15 años posteriores (2000-2015), la abundancia ha oscilado entre 10 y 107 individuos/200 metros de arroyo (Ruiz-Campos, 2017).

En la localidad La Grulla, la cual es la de mayor elevación reportada para la distribución de esta trucha endémica (2,080 msnm), Ruiz-Campos (2017) registró cambios en la abundancia poblacional dentro de un segmento de 200 m de arroyo durante tres años consecutivos: 42.1 individuos (27 de septiembre de 2014), 90.5 individuos (29 de agosto de 2015) y 20.3 individuos (17 de septiembre de 2016). Estas abundancias están asociadas a cambios en los niveles de flujo y cobertura del cauce por macrófitas acuáticas.

2.1.5 Hábitat

Esta trucha endémica tiene afinidad por aguas claras y bien oxigenadas preferentemente en altitudes de 1,219-1,350 msnm. Principalmente se pueden encontrar en pozas y recodos con una profundidad >30 cm, mayor cobertura vegetal (sombreado), sustrato arenoso (diámetro de partícula 0.0625 a 1.9 mm), mayor disponibilidad de presas y con poca corriente (menor gasto energético). Ocho tipos de unidades de hábitat (secciones del arroyo delimitadas visualmente sobre la base de características morfológicas e hidrológicas; cf. Dolloff et al., 1993; Cornell et al., 2008; Ruiz-Campos, 2017; Ruiz-Campos et al., 2021) fueron reconocidos por Ruiz-Campos (2017) en los arroyos de distribución de la trucha, donde sobresalieron, por su mayor densidad de individuos, las pozas y corriente en escalón, corriente de flujo laminar y las pozas con erosión central.

2.1.6 Intervalos fisicoquímicos

Ruiz-Campos (1993) registró los siguientes parámetros fisicoquímicos promedio en el arroyo San Rafael: pH 8.3, dureza 119.3 ppm, oxígeno disuelto entre 6.7-10.8 ppm, SiO₂ 14.6 ppm y iones bivalentes como el Mg 46.9 mg/L.

Por otro lado, Ruiz-Campos (2017) encontró que la temperatura del agua en los sitios de distribución de la trucha en el periodo 2014-2016 varió en función de la altitud: a 560 m, en el arroyo San Antonio de Murillos, la temperatura osciló entre 5.1 °C (enero) y 30.8 °C (agosto), con un promedio anual de 19.3 °C; en el arroyo San Rafael, a 1,240 msnm, la temperatura osciló entre 1.8 °C (enero) y 27.4 °C (julio), con un promedio anual de 14.6 °C. Por último, en el arroyo La Grulla, a 2,035 m, la temperatura osciló entre 4.5 °C (marzo) y 16.9 °C (septiembre), con un promedio anual de 11.9 °C.

2.1.7 Alimentación

La dieta de esta trucha endémica está compuesta de una alta diversidad de invertebrados, tanto bentónicos como pelágicos, donde sobresalen cuatro tipos de presas pertenecientes a insectos: *Simuliidae* (dípteros), *Seriscostomatidae*, *Hydropsychidae* e *Hydroptilidae* (tricópteros); exhibiendo una estrategia alimentaria especialista en el tipo y tamaño de presa consumida. La alimentación cambia dependiendo de la talla de la trucha, especialmente entre los individuos menores a 56 mm LP y aquellos mayores a 125 mm LP; asimismo, la dieta es cambiante con la estación del año, principalmente de invierno a primavera (Ruiz-Campos, 2017).

2.1.8 Reproducción y fecundidad

La época de desove de esta subespecie endémica se da en la estación invernal (enero a marzo), siendo el mes de febrero el de mayor actividad reproductiva. Los juveniles recién reclutados empiezan a ser conspicuos en la población a partir de mayo (Ruiz-Campos, 1993). Dicha época, viene acompañada por una preferencia por hábitats con los valores más altos de descarga y velocidad de corriente, cuyo resultado es la dispersión de los adultos reproductores, lo cual ayuda a favorecer la búsqueda de sitios adecuados para el evento de desove (Burner, 1951; Rantz, 1964; Smith, 1973).

La distancia mensual promedio de desplazamiento de esta subespecie es 14.6 m ($60.2 \text{ m}^2 \pm 16.5 \text{ m}$), exhibiendo poca amplitud en la mayor parte del año (4.4 a 12.7 m), excepto en febrero (33.9 m), cuando los adultos reproductores tienen un mayor movimiento en búsqueda de sitios de desove (Ruiz-Campos, 2017).

La madurez sexual de esta trucha endémica puede alcanzarse a una talla y edad de 103-112 mm de LP y un año, respectivamente. La fecundidad demuestra una relación directa con la talla, peso y edad de los individuos (Ruiz-Campos, 2017).

2.1.9 Edad y crecimiento

Esta trucha se distingue por tener una forma de talla pequeña en su medio natural (<220 mm de longitud patrón [LP]), de lento crecimiento y corta longevidad (≤ 4 años) y fecundidad relativa (15.34 huevos/cm de LP). El crecimiento corporal presenta un crecimiento de tipo alométrico negativo ($b = 2.796$) en el medio natural y de tipo alométrico positivo ($b = 3.136$) en cautiverio bajo condiciones controladas de temperatura, fotoperiodo y alimentación (Ruiz-Campos, 2017).

2.1.10 Ámbito hogareño

El ámbito hogareño se define como el espacio donde comúnmente se desplaza un individuo (Gerking, 1959), el cual varía según la especie y las características ecológicas del ambiente (Newman, 1956). El ámbito hogareño de esta trucha posee una correlación significativa con la profundidad y descarga del arroyo, así como con la densidad de presas a la deriva. Ruiz-Campos (2017) encontró que el valor promedio de la amplitud de ámbito casero de esta trucha endémica fue de 14.6 m (60.2 m^2), la cual es similar a lo observado para otros salmónidos en Norteamérica, como la trucha café *Salmo trutta*: $40\text{-}50 \text{ m}^2$ (Hesthagen, 1990), $15\text{-}30 \text{ m}^2$ (Bachman, 1984); salmón del Atlántico *Salmo salar*: 36 m^2 (Saunders y Gee, 1964), $40\text{-}50 \text{ m}^2$ (Hesthagen, 1990); trucha Gila *Oncorhynchus gilae gilae*: 10 m^2 (Rinne, 1982), y trucha garganta cortada *Oncorhynchus clarki*: $9\text{-}18 \text{ m}^2$ (Miller, 1957).

2.1.11 Parásitos

Ruiz-Campos (2017) encontró una prevalencia de helmintos parásitos del 81% para el trematodo *Crepidostomum cooperi*, y para el nematodo *Rhabdochona* cascadilla fue de 38%. La intensidad media parasitaria de *C. cooperi* incrementa con la talla y edad del huésped, no así en *R. cascadilla*.

2.2 Aspectos sociales de la sierra San Pedro Mártir

2.2.1 Históricos

La información más antigua acerca de la sierra San Pedro Mártir data del año 1701, cuando el sacerdote Jesuita Francisco Kino elaboró un mapa de la misma, nombrando Paso por Tierra a la California, en el cual muestra la porción nororiental de la península con el nombre de sierra Nevada, conocida actualmente como sierra San Pedro Mártir. Este mapa resultó de numerosas exploraciones por parte del sacerdote Kino a la región de la desembocadura del Colorado, con la finalidad de demostrar la peninsularidad de California (CONANP, 2009).

En 1874, en la sierra San Pedro Mártir se inició la explotación de minas de oro a pequeña escala, por los parajes El Socorro y Valladares en la parte este de esta sierra. Para ello, se realizaron grandes obras hidráulicas para facilitar las obras de extracción, las cuales dieron fin por consecuencia de la revolución mexicana en 1911. Dichas obras fueron ocupadas por más de cien indígenas Kiliwas (CONANP, 2009).

En el municipio de Ensenada, se encuentran los grupos indígenas Pai-Pai, Cochimí, Kiliwa y Kumiali. Los Kiliwas, son conocidos por sus numerosos enfrentamientos contra misioneros dominicos. Este grupo nómada habitaba en la sierra, donde sus principales actividades eran la recolección y cacería (Meigs, 1935).

El grupo indígena Kiliwa, considerado como el más pobre y marginado de Baja California, actualmente tiene una comunidad que continúa practicando la caza y recolección en las zonas de influencia del Parque Nacional de San Pedro Mártir (CONANP, 2009).

2.2.2 Socioeconómicos y población humana

Los factores socioeconómicos como la ganadería, agricultura, pesca, minería, etc., han sido utilizados ampliamente para determinar diferentes comportamientos en las comunidades humanas en la península de Baja California (Breceda, 2005).

En el área de influencia local se encuentran tres ejidos colindantes El Bramadero, El Tepi y Plan Nacional Agrario. El Ejido Bramadero, colindado en la parte oeste, sur y una pequeña porción del sureste del Parque, posee una extensión de 308,237, con 113 ejidatarios dedicados a la ganadería, agricultura, actividades cinegéticas, forestales y mineras. La localidad El Tepi se ubica al norte del Parque, teniendo una superficie de 71,006 ha, con 73 ejidatarios, sus actividades principales son la ganadería extensiva, turismo, pequeñas áreas de cultivo, actividades cinegéticas y aprovechamiento forestal de Yuca. Por último, El Ejido Plan Nacional Agrario, localizado en la colindancia este del Parque, cuenta con una extensión de 520.784 ha, con 215 ejidatarios, donde sus principales actividades son la ganadería extensiva, minería, turismo, agricultura y forestal no maderable (CONANP, 2009).

De los 37,613 habitantes que hay la región de influencia censados en el año 2000 (INEGI, 2000). la mayoría vive en los centros de población de los valles agrícolas de Camalú, Lázaro Cárdenas, San Quintín y Vicente Guerrero, donde su principal actividad económica es la agricultura de hortalizas de exportación.

La apertura de la carretera transpeninsular, contribuyó a un crecimiento rápido de la agricultura y a la creación de ejidos en la planicie costera en Colonet, Vicente Guerrero, Valle de San Telmo y San Quintín.

Antes de la agricultura en la zona, la economía en la sierra dependía en su mayoría de la ganadería. Actualmente la sierra San Pedro Mártir es utilizada para el pastoreo estival de ganado, dicho recurso proporciona entre el 50 y 75% de la producción ganadera de San Telmo y Santo Domingo.

Hoy en día, la actividad ganadera extensiva en la sierra San Pedro Mártir tiene cuatro principales vías: 1) Rancho Santa Cruz con dirección hacia el este a las

praderas de La Grulla y La Encantada; 2) Rancho El Coyote hacia el norte de sierra de la Corona al Corral de Sam; 3) Rancho San Isidoro a la Misión de San Pedro Mártir y la pradera de Santa Rosa; y 4) La Suerte a Arroyo Santa Eulalia en el sur de la sierra San Pedro Mártir. Es importante señalar que el ganado debe ser vigilado mientras permanece en el Parque y ser movido con frecuencia en busca de mejores pastizales (Meling-Pompa, 1991).

Dentro del polígono del Parque Nacional de San Pedro Mártir (PNSSPM) no existen asentamientos humanos. Sin embargo, en las áreas de influencia del Parque hay unos cientos de pobladores distribuidos en cuatro ranchos principales sobre el lado oriental y cinco ranchos sobre el lado occidental. Algunas rancherías pequeñas parecen estar en abandono, a excepción del Observatorio Astronómico Nacional, la altiplanicie de la sierra incluida en el Parque no tiene habitantes permanentes (CONANP, 2009).

La Ex-Hacienda Sinaloa, ubicada en el Valle de San Telmo, es considerada el centro de población más cercano, así como también, la misión de San Telmo, ubicada 15 km al oeste del Parque. En los últimos 20 años han crecido rápidamente asentamientos humanos a lo largo de la carretera transpeninsular, en asociación a las extensas plantaciones comerciales de tomate, tales como Camalú, Jaramillo, Colonia Vicente Guerrero, Lic. Gustavo Díaz Ordaz, Lázaro Cárdenas, San Quintín y Colonet (Tabla 1). Las actividades económicas en estos sitios son la agricultura de riego, la fruticultura y el cultivo de cereales de temporal (CONANP, 2009).

Los entornos más cercanos al PNSSPM son los ranchos El Potrero con 15 habitantes y Santa Cruz con siete, pertenecientes al Ejido el Bramadero y el poblado Ex-Hacienda de Sinaloa, donde habitan 56 familias, y sus principales actividades económicas son la agrícola y la crianza de ganado.

De acuerdo al Censo del año 2000 del INEGI, se enlistan en la figura 4 los ranchos, poblados y centros de población en el área de influencia del PNSSPM. Por otro lado, en la zona costera de influencia al Parque y de la sierra San Pedro Mártir, existen poblados que en conjunto llegan a poco más de 37,000 habitantes (INEGI, 2000).

Dichas poblaciones cuentan con servicios precarios de vivienda, saneamiento y agua.

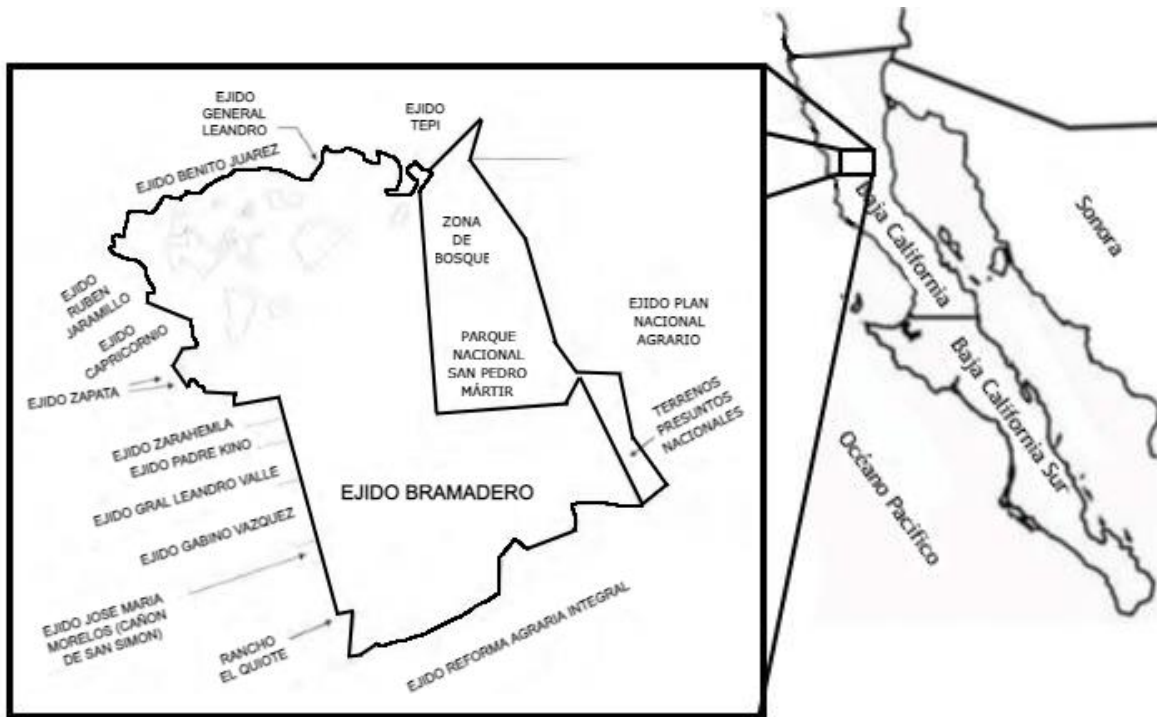


Figura 4. Ranchos, poblados y centros de población en el área de influencia del Parque Nacional San Pedro Mártir. Figura tomada de CONANP (2009).

Tabla 1. Localidades del área de influencia al Parque Nacional San Pedro Mártir.

Nombre localidad	Altitud (msnm)	Población total	Población masculina	Población femenina
Ex-Hacienda Sinaloa	350	240	*	*
Rancho el Carricito	360	7	*	*
San José	480	9	*	*
San José	40	8	*	*
Rancho San Telmo	60	6	*	*
Camalú	20	6,333	3,259	3,074
Vicente Guerrero	30	10,942	5,416	5,526
Misión Santo Domingo	80	36	19	17
San Quintín	28	4,634	2,299	2,335
Lázaro Cárdenas	20	12,134	6,140	5,994
Ejido México (Ejido Punta Colonet)	20	2,346	1,193	1,153
Ejido Rubén Jaramillo	60	1,149	583	566
Total		37,884	18,909	18,665

2.3 Impacto ambiental y amenazas

El ambiente se encuentra constituido por sistemas naturales, transformados y contruidos por acciones del hombre, incluyendo los sistemas físicos (aire, clima, agua y suelo), biológicos (fauna y flora) y humanos (población, cultura, economía y valores) (Velázquez-Miranda et al., 2011). El estado de conservación actual en el Parque Nacional es estable, sin embargo, sus ecosistemas son frágiles ante el disturbio potencial por diversas actividades antropogénicas y naturales presentes, tales como reducción del flujo del caudal por canalización para riego agrícola, ganadería, incendios forestales, aumento de temperatura por efecto del cambio climático, entre otras (CONANP, 2009).

Dentro de la Provincia Florística Californiana, el PNSSPM es un elemento de gran importancia, ya que sus bosques de coníferas y extensiones de chaparral y matorral mantienen un mejor estado de conservación que los encontrados en la parte estadounidense de la Provincia, como resultado de las diferencias de desarrollo, crecimiento demográfico y políticas de manejo (CONANP, 2009). Sin embargo, los bosques de coníferas de la zona se encuentran en latente peligro a incendios catastróficos por origen antropogénico.

La subespecie de trucha arcoíris *O. m. nelsoni* actualmente se encuentra catalogada en la categoría de protección especial en la Norma Oficial Mexicana 059 y en la categoría de preocupación especial por la American Fisheries Society, debido a su distribución y abundancia reducida. Hoy en día, sus poblaciones se encuentran amenazadas por disminución del flujo por canalización en sus arroyos de distribución para irrigación agrícola en los valles costeros entre Colonet y Santo Domingo, así como por la alteración del hábitat generado por la ganadería en la zona de la pradera de La Grulla (Ruiz-Campos, 2017).

A pesar de la escasa presencia de asentamientos humanos en el PNSSPM, existe una actividad ganadera en este Parque que data de hace más de 100 años, la cual ha sido manejada de manera extensiva en los sitios de pradera como La Grulla, La Encantada y Rancho Viejo, donde fluyen arroyos con trucha arcoíris endémica

(González-De La Barrera, 2021). A pesar de que las actividades ganaderas en este parque no deberían ser permitidas, aún se siguen practicando por considerarse una actividad tradicional por los pobladores de esta región.

En general, la sierra San Pedro Mártir y en particular el PNSSPM, han sido sobrepastoreadas desde el siglo pasado cuando había hasta 20,000 cabezas anualmente de ganado ovino para aprovechamiento de pastizales. Dicho tipo de pastoreo duró hasta mediados de la década de los setenta por consecuencia de la presión ejercida por parte de productores de ganado bovino. La actividad productiva más importante actualmente es la ganadería extensiva (CONANP, 2009).

González-De La Barrera (2021) menciona que los efectos de la ganadería en las praderas de la sierra San Pedro Mártir, han ocasionado un alto nivel de erosión debido al pisoteo por el ganado, provocando compactación y destrucción de túneles de los roedores de las praderas como el ratón meteoro (*Microtus californicus huperuthrus*), así como, azolvamiento del canal del arroyo y pérdida de vegetación que provee de sombra a las pozas y mantiene las condiciones térmicas apropiadas para las truchas. Así mismo, las heces fecales del ganado vertidas directamente en el lecho del arroyo, contienen compuestos nitrogenados y de fósforo, los cuales promueven el aumento de bacterias coliformes en el agua del arroyo y la eutrofización de las pozas (Ruiz-Campos, 2017).

2.3.1 Casos de amenazas antropogénicas

Uno de los grandes problemas que está enfrentando la conservación de los salmónidos nativos en Norteamérica está relacionado con la introducción de especies exóticas invasivas, que pueden competir por espacio y/o alimento con especies nativas (Ruiz-Campos, 2017). Esto toma mayor importancia en el caso de la introducción de especies congénéricas o conespecíficas con las que se puede dar el proceso de hibridación de las formas autóctonas con truchas no nativas, estas últimas introducidas en los arroyos y sistemas lacustres para fines de cultivo y pesca deportiva, provocando pérdida de diversidad genética, y declive poblacional de especies nativas (Allendorf et al., 2001; Behnke, 1992; Berg y Gall, 1988; Camarena-Rosales et al., 2008; Cucherousset y Olden, 2011). Así mismo, los aumentos de la temperatura del agua reducen los hábitats río abajo y, con ello permiten que las especies no nativas adaptadas a ambientes más cálidos en las áreas río abajo, invadan aguas arriba (Fausch et al., 2006, Rieman et al., 2006, Rahel y Olden, 2008).

Otra actividad a tomar en consideración, es la construcción de obras hidráulicas (represas, presas, canales de irrigación, etc.) que alteran los regímenes de flujo y de temperatura, y también, cambian el patrón de nutrientes que fluyen río abajo (Marcus et al., 1990). La construcción de caminos o brechas son actividades que causan los principales procesos de erosión y/o sedimentación en arroyos, alterando las condiciones necesarias para tener una calidad de hábitat óptima (flujo y cobertura) para los salmónidos (Marcus et al., 1990).

Por su parte, la ganadería es una de las actividades que mayormente alteran los ecosistemas riparios y acuáticos, debido a la remoción de la vegetación y la compactación del suelo, ocasionando un cambio en la morfología de los arroyos e incrementando la temperatura del agua, provocando una disminución en la calidad de hábitat de las truchas (Zoellick y Cade, 2006).

A pesar de que esta trucha nativa se encuentra en la categoría de protección especial por la NOM-059-ECOL-2010, aún existe pesca clandestina por pescadores

furtivos, o bien, promovida por ranchos dedicados a las actividades de ecoturismo en la sierra San Pedro Mártir (Ruiz-Campos, 2017).

Los incendios forestales históricamente ocasionan una reducción o aclaramiento en la cobertura de la vegetación que brinda sombra y hojarasca al lecho de los arroyos. Cambios en la estructura de la vegetación antes y después de un incendio forestal son notables, lo que provoca una reducción significativa de hábitats de sombreado y con ello, incremento en la temperatura del agua por una mayor incidencia en los rayos solares. Así mismo, pueden causar la mortalidad de peces por temperaturas excesivas (Hitt, 2003). Se ha documentado que las cenizas derivadas de los incendios forestales que se depositan en el fondo de los arroyos, en época de crecidas por las lluvias estacionales, son arrastradas por efecto de la corriente y actúan como un agente abrasivo que dañan las branquias de las truchas, provocando una mortalidad poblacional (Ruiz-Campos, 2017). Sin embargo, estos efectos suelen ser de corto plazo y las poblaciones pueden recuperarse con rapidez a través de la inmigración desde refugios cercanos que no fueron afectados por los incendios (Ruiz-Campos, 1993, Rieman y Clayton 1997, Dunham et al., 2003).

Los procesos de cultivo de truchas provocan contaminación del hábitat acuático natural donde es establecida la producción, aumentando la materia orgánica y nutrientes favorables para el florecimiento de microalgas por eutrofización, las cuales se ha encontrado que son perjudiciales para los salmones, ocasionándoles asfixia y, posteriormente, la muerte (ProMED, 2016). Esta contaminación asociada al material orgánico en descomposición y a la emisión de ácido sulfhídrico debido a una masiva muerte de salmones están generando un problema ecológico, de gran impacto ambiental y económico (AQUA, 2016).

2.3.2 Casos de amenazas naturales

El calentamiento global afecta la distribución de las especies y modifica su hábitat aumentando o disminuyendo su ámbito de distribución (Parmesan y Yohe, 2003; Root et al., 2003). El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático [IPCC, por sus siglas en inglés] (2007) afirma que el calentamiento global evidente en el reciente registro instrumental continuará e incluso se acelerará. Las temperaturas globales han aumentado en un promedio de aproximadamente 0.85 °C desde finales del siglo XIX, y los eventos climáticos extremos, incluidas tormentas, inundaciones, sequías y olas de calor, están aumentando en frecuencia (Christensen y Christensen, 2003; Stocker et al., 2013).

Las temperaturas del aire más cálidas (Abatzoglou y Redmond, 2007; IPCC, 2007) provocan un aumento en la variabilidad de las precipitaciones (Hamlet y Lettenmaier, 2007) y la frecuencia de los incendios forestales (Westerling et al., 2006; Morgan et al., 2008), así como la disminución de la capa de nieve y los niveles de oxígeno disuelto en el agua (Mote et al., 2005). Los eventos antes mencionados son responsables del calentamiento de las aguas de ríos y arroyos (Petersen y Kitchell, 2001; Morrison et al., 2002; Bartholow, 2005), la alteración de las corrientes hidrológicas (Barnett et al., 2008; Luce y Holden, 2009), y la mayor perturbación de los lechos de los ríos debido a inundaciones, deslizamientos de tierra y flujo de escombros (Istanbulluoglu et al., 2004; Hamlet y Lettenmaier, 2007).

Es conocido que la temperatura gobierna en gran medida la distribución y abundancia de especies a escala espacial y temporal (Rieman et al., 2007). A medida que avanza el calentamiento global y aumentan las temperaturas en el planeta, las comunidades acuáticas en sistemas lóticos como arroyos y ríos tendrán que adaptarse a nuevos hábitats modificados térmicamente. Sin embargo, estas comunidades pueden experimentar dificultades de adaptación en lugares donde las redes fluviales están fragmentadas debido al desarrollo de infraestructura hídrica que modifica la calidad y cantidad del flujo río abajo (Daufresne y Boet, 2007; Heino et al., 2009).

En este contexto, los miembros de la familia Salmonidae son estrictamente dependientes de aguas frías con altos niveles de oxigenación y flujo (Leppi et al., 2010), por lo que cambios en las temperaturas máximas del agua de solo unos pocos grados debido al calentamiento global, consecuentemente ejercerán efectos significativos sobre la presencia y distribución de truchas en ecosistemas de arroyos (Magnuson et al., 1997; Lyons et al., 2009; Rieman y Isaak, 2010).

Se ha documentado ampliamente que las temperaturas del agua $>25^{\circ}\text{C}$ resultan ser letales para la mayoría de las truchas arcoíris (Bidgood y Berst, 1969), incluida la subespecie de la trucha arcoíris del suroeste de los EE.UU. (Matthews, 2011). En los arroyos del sur de California, EE. UU., se registran temperaturas de hasta 28°C en el verano, siendo las truchas arcoíris forzadas a desplazarse a pozas profundas térmicamente más estables (Matthews y Berg, 1997). Una posible explicación de la supervivencia de esta trucha a altas temperaturas es el refugio que ofrecen los micro-abrigos térmicos creados por las entradas de agua subterránea o estanques estratificados (Matthews y Berg, 1997). Sin embargo, la extensión del hábitat de refugio que ofrecen estos sitios es incierta debido al probable aumento de la temperatura del agua en las próximas décadas.

Varios factores influyen en la idoneidad del hábitat de los peces salmónidos. Crozier y Zabel (2006) encontraron una baja supervivencia de los salmónidos en arroyos cálidos anchos con tasas de flujo bajas, mientras que una supervivencia alta en arroyos más fríos y estrechos con tasas de flujo. En corrientes más cálidas y anchas, el proceso de desarrollo del individuo se deteriora a medida que la temperatura se eleva por encima del nivel óptimo, mientras que el riesgo de depredación aumenta (Marine y Cech, 2004) y la disponibilidad de presas disminuye (Bisson y Davis, 1976).

2.3.3 Estudio de caso: trucha de San Pedro Mártir

En los arroyos de las cuencas de los ríos de Santo Domingo y San Rafael en la sierra San Pedro Mártir (SSPM), Baja California, México, habita la subespecie endémica de trucha arcoíris *O. m. nelsoni*, también conocida como trucha de San Pedro Mártir (Evermann, 1908).

Ruiz-Campos (2017) ha pronosticado que un aumento en la temperatura promedio del agua durante el verano del orden de 1 a 2 °C en la localidad tipo (Rancho San Antonio) de *O. m. nelsoni*, a 560 msnm, podría alcanzar de manera sostenida la temperatura letal para esta subespecie, la cual podría estar como en la mayoría de las subespecies de trucha arcoíris en Norteamérica, a valores ≥ 28 °C (Kammerer y Heppel, 2013a). Por lo cual, un escenario bajo este cambio de temperaturas generaría un confinamiento en su ámbito de distribución altitudinal, sobreviviendo solo en aquellas elevaciones donde el ámbito térmico es apropiado. Así mismo otra amenaza a corto plazo es la introducción de especies ícticas exóticas, que es una de las mayores problemáticas que está enfrentando la conservación de truchas nativas en Norteamérica, debido a que está asociado con la hibridación de las formas autóctonas con truchas no nativas que son introducidas en los arroyos y sistemas lacustres para fines de cultivo y pesca deportiva (Escalante et al., 2016; Ruiz-Campos, 2017). Especies exóticas ícticas han sido detectadas en la parte baja del arroyo Santo Domingo (*Gambusia affinis* y *Lepomis cyanellus*), afortunadamente aún no hay registros en la localidad tipo de la trucha de San Pedro Mártir (Ruiz-Campos et al., 2000). Por ello, la conservación poblacional de esta trucha endémica de la sierra San Pedro Mártir, dependerá de la planeación y aplicación oportuna de un programa de conservación holístico a nivel de cuenca hidrológica, que permita garantizar la continuidad de este taxón endémico, patrimonio biológico y elemento insustituible de la sierra San Pedro Mártir.

3. Marco teórico

Con la finalidad de mantener la viabilidad de las poblaciones de la trucha endémica de San Pedro Mártir (*O. m. nelsoni*) y sus hábitats, es de vital importancia realizar un plan de conservación holístico bajo un enfoque de cuencas en la sierra San Pedro Mártir y sus zonas de influencia (Casas-Jiménez et al., 2017). En el presente estudio fue aplicado el modelo Fuerzas motrices, Presión, Estado, Impacto y Respuesta (en lo sucesivo referido como FPEIR). Esta metodología ha sido utilizada en particular en aquellos aspectos vinculados con la sostenibilidad (Pulido, 2009; Bobadilla et al., 2013). El enfoque FPEIR es de un interés particular entre investigadores y legisladores como marco conceptual para la comunicación y formulación de las políticas públicas (Svarstad et al., 2008). Este modelo parte del hecho que el desarrollo humano (actividades socioeconómicas) ejerce una presión en el ambiente, ocasionando que el estado del ambiente se modifique (salud ambiental, disponibilidad de recursos, biodiversidad), pudiendo ocasionar un impacto en la salud humana, en los ecosistemas y en los bienes materiales, produciéndose una respuesta en la sociedad (decisiones y acciones) que puedan modificar las fuerzas motrices originales, las presiones, los cambios en el ambiente y los impactos registrados (Fig. 5). Este modelo *“proporciona una visión integrada de los problemas en relación con las causas que los producen, incluyendo en el modelo las respuestas surgidas desde las administraciones públicas, los sectores económicos y la sociedad civil”* (Azuz-Adeath et al., 2010).

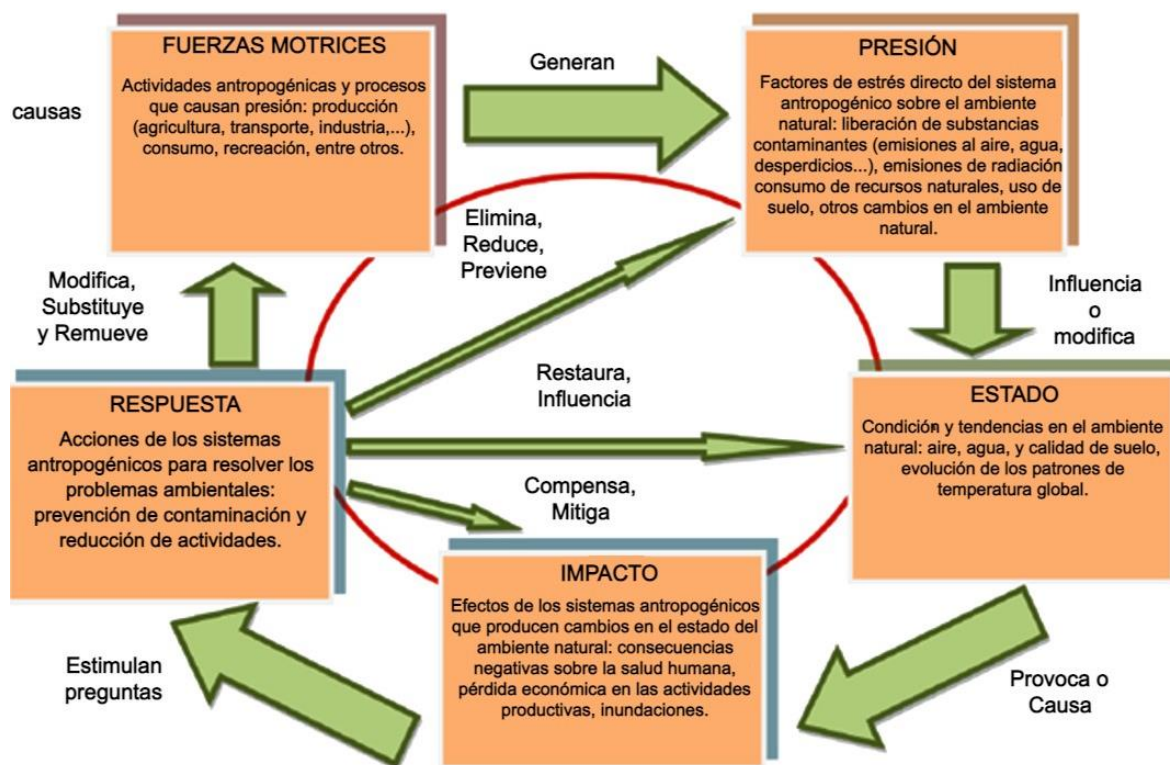


Figura 5. Modelo Fuerzas motrices-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (Fuente: OCDE, 2007).

La construcción del modelo FPEIR se da a partir de indicadores ambientales, los cuales sirven para medir las fuerzas motrices, presión, estado e impacto, y con ello, tomar decisiones sobre qué actividades (respuesta) deberán ser aplicadas para ayudar a mejorar o mantener la calidad del ambiente. Para la elección de estos indicadores, la OCDE en 2007, estableció una lista de características que debe cumplir un indicador, tomando en cuenta que a veces no es posible cumplir con todas, las tres primeras son criterios básicos. De esta forma, un indicador puede ser usado como herramienta para la evaluación del medio ambiente y políticas públicas. Por tanto, un indicador deberá proporcionar información suficiente sobre la condición ambiental, deberán ser sencillos, de fácil interpretación y que respondan a los cambios en el ambiente y a las actividades humanas (Velázquez-Miranda et al., 2011).

Mediante el uso de indicadores de ecología poblacional y de paisaje, análisis documental, análisis de riesgo y análisis de amenazas, complementados con indicadores de ecología del paisaje, pudimos definir las fuerzas motrices, presión, estado e impacto, para la construcción del modelo FPEIR utilizado en este estudio.

3.1 Fundamentos de Ecología del Paisaje

Forman y Gordon (1986) definen la ecología del paisaje como la *“superficie o porción del terreno heterogénea compuesta por una agrupación de ecosistemas (interrelacionados o interactivos entre sí) que se repiten de igual forma a través de dicha superficie (siguiendo un patrón) y que comparte: un mismo tipo de interacciones o flujos entre los ecosistemas de agrupación, los mismos climas y geomorfología, y un mismo régimen de perturbaciones”*. El paisaje puede ser estudiado desde diferentes puntos de vista, según la disciplina y puede ser descrito de distintas maneras, con un objetivo estético, como por ejemplo un territorio.

De acuerdo con Forman y Gordon (1981) la matriz es el elemento dominante y que le da personalidad al paisaje, los parches son las unidades que se diferencian de forma clara con lo demás que los rodea, y los corredores, son los elementos lineales de origen natural tales como ríos, o de origen antropogénico, como caminos o veredas (Fig. 6).

Un mosaico está conformado por parches, y una red está formada por una estructura de corredores. Estos son separados por bordes de línea interior y exterior, lo que permite encontrar el arreglo espacial de parches, ayudando a diferenciar estructuras entre dos paisajes (Burel y Baudry, 2003).

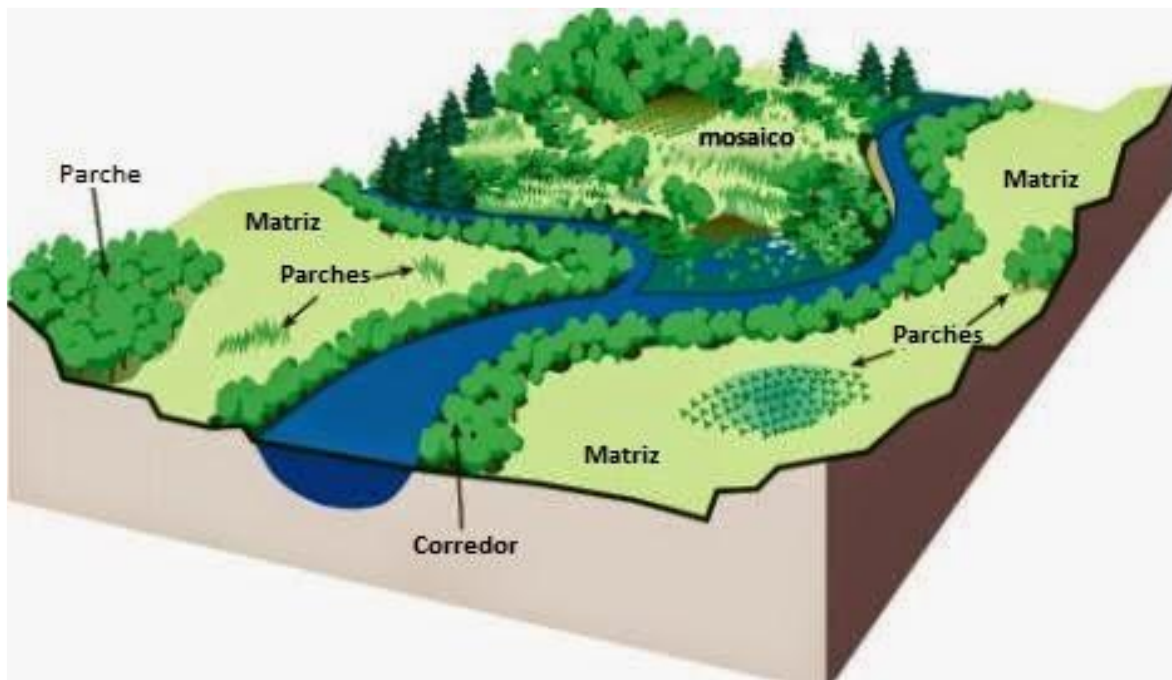


Figura 6. Elementos del paisaje basados en Forman y Gordon (1981).

Los elementos que componen un mosaico son llamados parches individuales. Dichos elementos son encontrados inmersos en la matriz; el tamaño y la forma son variables importantes para los flujos bióticos y abióticos. Forman (1995) indicó que los parches estructurales pueden ser clasificados por (1) la composición del suelo y la vegetación, (2) los factores de recursos que en su mayoría se relacionan con la ecología de los animales, (3) los factores de hábitat que pueden ser de distintas comunidades y normalmente más grandes que el ámbito hogareño, y (4) los factores de corredor, los cuales son parte del paisaje que utiliza un organismo para moverse, explorar, dispersarse y migrar.

La relación entre parches es de vital importancia en la ecología del paisaje, haciendo fundamental su número y distribución para explicar el flujo de nutrientes y energía, traslado de poblaciones, propagación de disturbios o perturbaciones y cualquier otra relación entre el medio y los organismos en el que viven (Iraztorga-Vaca, 2006).

La conectividad, fragmentación y heterogeneidad son los términos de aproximación cualitativa para el estudio del paisaje. Uno de los principales problemas en la ecología del paisaje es el drástico cambio de los paisajes como consecuencia de las actividades antropogénicas, ocasionando pérdida del hábitat y fragmentación para diversas especies. Dichas especies necesitan de redes de parches interconectadas para su supervivencia, debido a que la recolonización dependerá de la disponibilidad de dispersión de los organismos y la facilidad de moverse dentro del paisaje, nombrándolo conectividad (Kindlmann y Burel, 2008).

3.1.1 Conectividad

La conectividad es el grado con el cual el paisaje facilita o impide el movimiento de individuos a través de parches. En este término se distinguen dos términos básicos: (1) la conectividad estructural, que es el acomodo del paisaje sin relación alguna con los organismos, y (2) la conectividad funcional que toma en cuenta la conducta de los organismos dentro de los parches o bordes y la configuración espacial de todo el sistema (Luque y Fortín, 2012).

Es importante distinguir entre estos dos términos, donde la conectividad del paisaje es una propiedad del paisaje entero, y el segundo, la conectividad de parches, que identifica la conectividad de cada atributo de un parche, utilizado para definir metapoblaciones. Las mediciones están basadas en presencia, ausencia o configuración de corredores, esto no implica que se pueda aplicar de manera general, ya que la posibilidad de utilizar un corredor cada especie es diferente (Kindlmann y Burel, 2008).

3.1.2 Fragmentación

La fragmentación se define como el cambio de cobertura sufrido en una parte del paisaje (Collinge y Forman, 2009). Su repercusión es inversa a la conectividad de las poblaciones de un territorio.

La fragmentación está relacionada con las perturbaciones, tanto naturales como antropogénicas. Dichas perturbaciones ocasionan daños reversibles a las relaciones ecológicas, llegando a recuperarse mediante ciertas acciones. En el caso de ser daños irreversibles, algunas de estas relaciones desaparecerán y los territorios quedarán aislados, ocasionando que estos sufran diferentes evoluciones (Kindlmann y Burel, 2008).

3.1.3 Heterogeneidad

La heterogeneidad es la propiedad de diversificación de la estructura del paisaje con base en un gradiente diferencial o en separaciones ecotonales abruptas y discretas (Irastorza-Vaca, 2006); también puede ser definida como la distribución irregular y no aleatoria de objetos percibida a cualquier escala de investigación. Dicho término está en función de cada uno de sus elementos (parches, corredores, configuración espacial y complejidad de la red espacial, por lo cual es indispensable la identificación de dichos elementos para poder medir la heterogeneidad en un paisaje (Burel y Baudry, 2003).

Irastorza-Vaca (2006) señaló a que la heterogeneidad de un paisaje muestra la distribución de especies de flora y fauna, las relaciones entre éstas, y transferencia de materia y energía entre los elementos relacionados.

3.1.4 Metapoblación

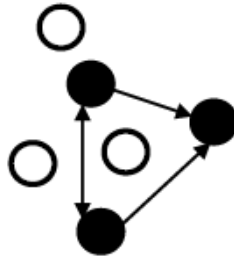
Cada población de una especie tiene un cierto grado de estructura espacial más amplio que el de otras, siendo independientes entre sí, formando una población mixta. En un escenario de poblaciones discretas es posible localizar metapoblaciones, existiendo una serie de débiles interacciones entre las poblaciones locales, equivalente a tener una población de poblaciones. El número de poblaciones locales depende de las colonizaciones y extinciones, procesos característicos de las metapoblaciones (Van Nouhuys, 2009).

MacArthur y Wilson (1967) en su teoría de biogeografía insular enfatizaron los procesos de colonización y extinción, con el fin de explicar los patrones de riqueza de especies, correspondiente con la propuesta de metapoblaciones dada por Levins (1968). Existen diferentes estructuras poblacionales (Fig. 7), con distinta dinámica y estructura parecida, separados espacialmente en forma de parches dentro de un paisaje, sin embargo, con una funcionalidad diferente. La metapoblación clásica de Levins (Figura 7a) está basada en parches de hábitat con diferente tamaño, calidad

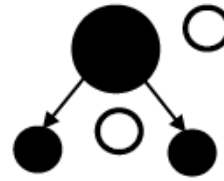
y aislamiento, donde cada parche tiene la misma posibilidad de extinguirse o ser colonizado, y una dinámica de parches asincrónica. La variación Isla-Continente (Figura 7b), descrita por Harrison (1991), es un tipo extremo de estructura poblacional, de una o más poblaciones muy grandes (continente) con un riesgo casi nulo de extinción, y las poblaciones restantes (islas) corren un alto riesgo de extinción en sus fragmentos pequeños de hábitat, por tanto, las poblaciones de los parches grandes (continentes) persisten, al igual que en aquellas de Fuente-Sumidero (Figura 7b) descritas por Pulliam (1988); sin embargo en ésta se designa una población como Fuente o Sumidero dependiendo de la calidad del hábitat y no necesariamente por el tamaño del parche, mientras que la “Fuente” es definida como la población o poblaciones con crecimiento positivo, donde la cantidad de especímenes excedentes es exportada a las poblaciones aledañas.

Por otro lado, las poblaciones “Sumidero” tienen un crecimiento negativo, provocado por la inmigración. Otra alternativa es la población parchada “Patchy” (Figura 7c), siendo ésta no realmente una metapoblación, pues es solo una población grande que ocupa varios parches de un hábitat. Por último, la variación de metapoblación “Desequilibrio” (Figura 7d), es característica por ser la que tiene un mayor problema de conservación, debido a que las poblaciones locales no logran mantenerse debido a su aislamiento, provocando un crecimiento negativo generalizado de toda la metapoblación, ocasionando una inminente extinción de la especie en el sitio. Hanski y Gaggiotti (2004) mencionan que una metapoblación puede llegar a tener más de uno de estos tipos de variaciones en diferentes partes de su metapoblación.

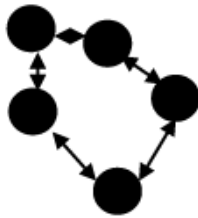
a) Clásica de Levins



b) Isla- Continente y Fuente - Sumidero



c) Parchada



d) Desequilibrio

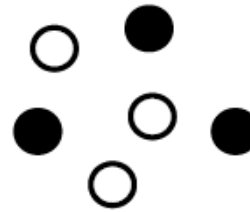


Figura 7. Estructuras metapoblacionales: a) Clásica de Levins, b) Isla–Continente y Fuente–Sumidero, c) Parchada, y d) Desequilibrio. Las flechas indican el desplazamiento poblacional, los círculos claros indican parches disponibles y los círculos oscuros las poblaciones locales. Tomado de Flores-Galván, 2013.

3.1.5 Métricas del paisaje

Las métricas de paisaje brindan información numérica sobre la composición y configuración del paisaje estudiado, la proporción de cada cobertura del suelo y la forma de los elementos paisajísticos, así mismo, permiten realizar una comparación entre diferentes configuraciones, la misma área en distintos tiempos y definición de futuros escenarios (Neel et al., 2004).

Vila y colaboradores (2006) explican que existen cinco tipos de métricas de paisaje:

- 1.- Métrica de área. Se refiere a la superficie, variabilidad y densidad, centrada en las características de dimensión y número de parches que constituyen el área de estudio.
- 2.- Métrica de forma. Fundamentada en las características de forma de los parches que conforman un determinado paisaje.
- 3.- Métrica de ecotono y hábitat interior. Permite realizar cálculos sobre amplitud del ecotono en relación con el hábitat interior.
- 4.- Métrica de distancia, vecindad y conectividad. Calcula la distancia desde el hábitat borde y ecotono de un parche hasta el próximo parche del mismo tipo.
- 5.- Métrica de diversidad de paisaje. Aporta información para la comparación de diferentes paisajes o la evolución del mismo en distintos momentos históricos.

De los tipos de métricas explicadas anteriormente, hay una gran variedad de éstas que son usadas ampliamente, sin embargo, para propósitos de esta investigación, solo serán descritas tres (cf. Leitao et al., 2006):

- 1.- Proporción de área por clase (CAP). Es la proporción de una cobertura en particular en el paisaje, refiriéndose así, a la abundancia de los tipos de parche en el paisaje sin considerar la parte espacial, la colocación dentro del mosaico. CAP puede expresarse en forma porcentual multiplicando el valor resultante por cien, recibiendo el nombre de porcentaje del paisaje (PLAND). Se recomienda usar esta variedad en conjunto con otra y otras variedades de índices (media de parches

“AREA_MN” o densidad de parches “PD”), para diferenciar la matriz, identificación y cuantificación de coberturas poco comunes o raras en las cuales habrá que considerarse en un plan de manejo, y siendo útil para la caracterización de la uniformidad de un paisaje, siendo un componente importante de la diversidad del paisaje.

2.- Número de parches (PN). Es el total de parches a nivel paisajístico o clases, el nivel de clases abarca todos los parches de una cobertura específica. Para comparar valores de PN de muchos paisajes con diferente tamaño y acomodo es recomendable utilizar la densidad de parches (PD), ya que esta normaliza a PN dividiéndolo por el tamaño del paisaje. Cuando el área de las clases es constante, PN sirve de manera eficiente como índice de fragmentación y heterogeneidad para la comparación de paisajes. Con ello, PN se utiliza cuando se consideran especies de un mismo tipo de hábitat dentro de una metapoblación, sirviendo como un sustituto para el número de subpoblaciones influyentes en la dinámica y persistencia de las metapoblaciones. Es recomendable en conjunto utilizar PN con las métricas de área de parches (PA), tamaño de parche (AREA_AM), proporción de área por clase (CAP), radio (GYRATE), forma de parche (SHAPE) y proximidad (PROX), con el fin de tener una complejidad más completa del paisaje y así poder describir la distribución espacial, la conectividad y forma de los parches.

Para el análisis de la distancia de un parche con respecto a otro del mismo tipo de cobertura, se hace uso de la métrica de la distancia euclidiana al vecino más cercano (ENN), dicho índice sirve para la configuración del paisaje ya que es explícitamente relativo con el arreglo, locación y caracterización de la distribución espacial de los parches. En su aplicación es considerada en las teorías de la biogeografía insular y metapoblación y en la fragmentación, ya que la distancia es el factor más importante.

3.- El índice de proximidad (PROX). Es una medida sin unidades de aislamiento de los parches, que nos da información sobre el tamaño y distancia de un parche a otro focal o específico con un radio definido. Es utilizada para la comparación de diferentes parches o la configuración espacial en diferentes paisajes, también

funciona para priorizar y adquirir reservas para la vida silvestre, ya que utilizando como radio el ámbito hogareño de cierta especie, es posible determinar la proximidad relativa de los hábitats.

De esta manera, el uso de métricas del paisaje contribuye en la determinación del estado actual del sistema y la condición de la población, elementos claves para la construcción de estrategias de conservación de especies amenazadas, protección especial o en peligro de extinción, como es el caso de la trucha de San Pedro Mártir, catalogada en la categoría de protección especial en la NOM-059-SEMARNAT-2010.

4. Justificación

A pesar de que el estatus de conservación poblacional actual de la trucha de San Pedro Mártir es considerado estable (Ruiz-Campos, 2017), sus poblaciones están enfrentando una serie de amenazas relacionadas con la alteración de sus hábitats por impactos antropogénicos y naturales. Por lo cual, la realización de esta propuesta de plan de conservación, tomando como especie indicadora a la trucha de San Pedro Mártir, ayudará a mitigar las problemáticas en la que se encuentra dicha trucha y sus hábitats.

El trabajo se llevó a cabo en la cuenca del río Santo Domingo, debido a que en esta zona se encuentra la localidad tipo (Rancho San Antonio) y la mayoría de problemáticas relacionadas con actividades antropogénicas y naturales anteriormente mencionadas.

5. Objetivos de investigación

5.1. Objetivo general:

Evaluar la calidad del hábitat y las amenazas en la distribución poblacional de la trucha endémica, *Oncorhynchus mykiss nelsoni* (Evermann, 1908), en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, y generar una propuesta de conservación integral mediante el modelo FPEIR (Fuerzas Motrices-Presión-Estado-Impacto-Respuesta).

5.2 Objetivos específicos:

5.2.1 Determinar el estado de conservación de la trucha endémica *O. m. nelsoni* y sus hábitats, en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, México.

5.2.1.1 Evaluar las variaciones de las temperaturas de agua durante el periodo 1996-2019 en las localidades La Grulla, San Rafael y San Antonio de Murillos, para su predicción en escenarios en los años 2025 y 2050.

5.2.1.2 Determinar la composición fisicoquímica del agua en los sitios donde habita la trucha *O. m. nelsoni* durante el año 2019.

5.2.1.3 Evaluar la variación de los caudales de los arroyos de distribución de la trucha *O. m. nelsoni* en la cuenca del río Santo Domingo, durante el periodo 1995-2019.

5.2.1.4 Caracterizar la distribución y abundancia histórica y actual de la trucha endémica en la cuenca del río Santo Domingo.

5.2.1.5 Caracterizar las unidades de hábitat (unidades paisaje) en los sitios de distribución de la trucha *O. m. nelsoni*, así como los procesos que permiten su presencia.

5.2.2 Identificar y dimensionar las Fuerzas Motrices, Presión, Impacto y Respuesta en las localidades de estudio.

5.2.2.1 Identificar y dimensionar las amenazas del sistema para la conservación de la trucha endémica *O. m. nelsoni* y sus hábitats, en la cuenca del río Santo Domingo

5.2.2.2 Identificar las acciones (respuestas) que se están llevando a cabo para la mitigación o disminución de las problemáticas existentes y mejora del estado actual de esta subespecie endémica y sus hábitats. Para ello se identificarán los esfuerzos sociales y políticos que se están llevando a cabo para prevenir, compensar, aminorar o adaptarse a los cambios en el estado del medio donde se está llevando a cabo esta investigación.

5.2.3 Construir y analizar el modelo FPEIR durante esta investigación.

5.2.3.1 Elaborar el modelo FPEIR con la información del estado del hábitat y la especie indicadora, las fuerzas motrices, presión e impacto y las respuestas que se están llevando a cabo para disminuir/mitigar las fuerzas motrices, presiones, impactos y mejorar el estado de la especie evaluada y sus hábitats.

5.2.4 Generar una propuesta de conservación y manejo integral de la cuenca del río Santo Domingo, ubicando como actor principal a la trucha endémica *O. m. nelsoni*.

5.2.4.1 Identificar a nivel sistema y unidad las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de la cuenca del río Santo Domingo.

5.2.4.2 Reconocer los actores potenciales para llevar a cabo las propuestas de conservación para el área de estudio.

5.2.4.3 Elaborar un mapa con el índice EstPre para cada de una de las localidades del área de estudio.

5.2.4.4 Generar una propuesta de conservación y manejo integral de la cuenca del río Santo Domingo, ubicando como actor principal a la trucha endémica *O. m. nelsoni*.

6. Área de estudio

6.1 Localización

La cuenca del río Santo Domingo posee una superficie de captación de 122,700 ha (Zúñiga-Castillo, 1995), la cual está localizada dentro de la SSPM (Fig. 8). Los muestreos en campo fueron realizados en segmentos de arroyos de la distribución conocida de la trucha endémica en la cuenca del río Santo Domingo, pendiente occidental de la sierra San Pedro Mártir (SSPM), Baja California, México, en las siguientes localidades: pradera La Grulla (30°53'31.23"N, 115°28'55.82"O, altitud 2,080 msnm [Fig. 9]), rancho El Potrero (30°54'59.80"N, 115°38'44.40"O, altitud 950 msnm [Fig. 10]) y rancho San Antonio de Murillos (localidad tipo) (30°49'5.12"N, 115°37'50.24"O, altitud 553 msnm [Fig. 11]).

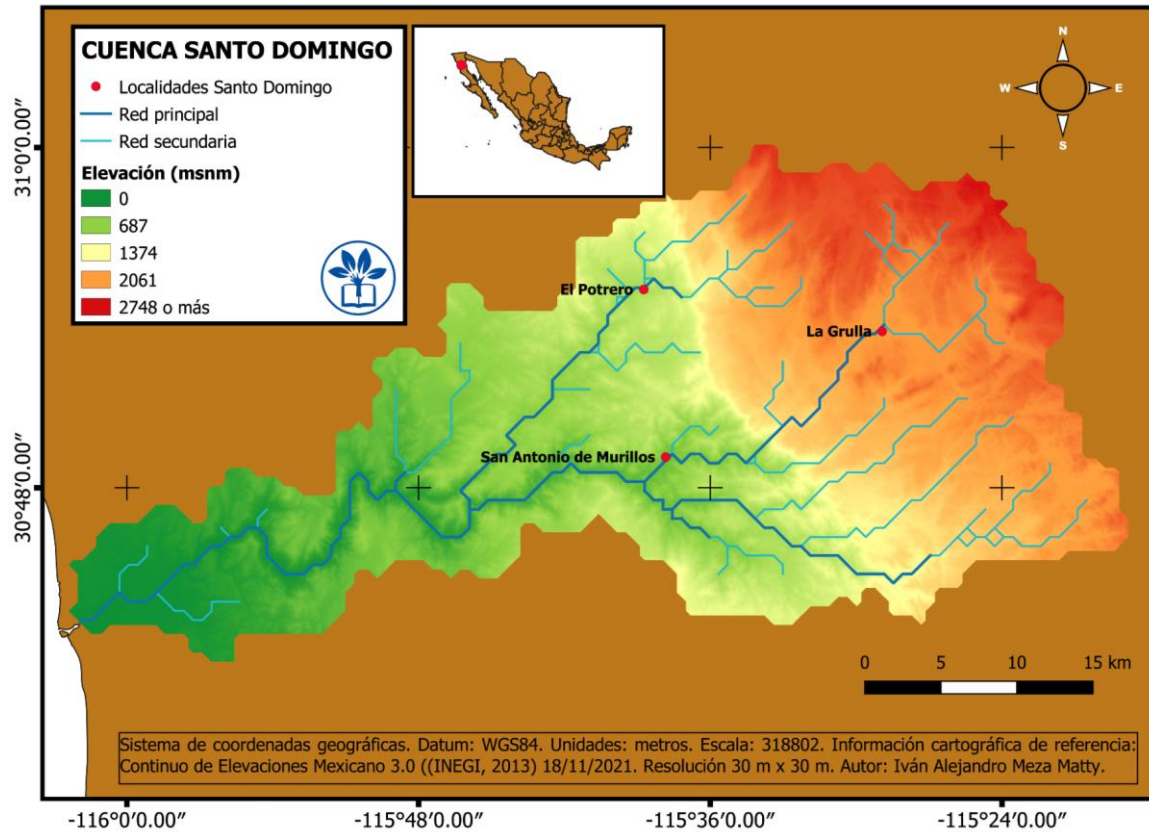


Figura 8. Área de estudio: Localidades “La Grulla”, “El Potrero” y “San Antonio de Murillos (Localidad tipo)” en la cuenca del río Santo Domingo con sus principales y secundarias redes hidrográficas. Baja California, México.



Figura 9. Imágenes del sitio de muestreo en el arroyo La Grulla, Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. (Fotografías: A, Iván Alejandro Meza Matty; y B, Gorgonio Ruiz-Campos).



Figura 10. Imágenes del sitio de muestreo en el arroyo El Potrero, Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México (Fotografías: Iván Alejandro Meza Matty).



Figura 11. Imágenes del sitio de muestreo en el arroyo San Antonio de Murillos, Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México (localidad tipo de la trucha *O. mykiss nelsoni*). Fotografías: A, Ivan A. Meza Matty; y B, Gorgonio Ruiz-Campos.

6.2 Geomorfología

La SSPM es considerada la formación batolítica más alta dentro del Rango Peninsular, comprendido desde el sur de California, E.U.A. hasta el extremo sur de la península de Baja California, México (O'Connor y Chase, 1989).

Evidencias geológicas indican que hace 14 millones de años se inició el levantamiento de batolito o plutón de la SSPM hasta su posición actual, debido a un evento tectónico de gran escala que afectó toda la margen del Pacífico del Noroeste de México, originando un cambio de límite y dirección del movimiento entre la Placa del Pacífico y la de Norteamérica (Gastil et al., 1979; Barajas, 1991). Dicho batolito está compuesto por rocas ígneas intrusivas, principalmente de tipo granodioritas, dioritas y granitos (Gastil et al., 1975).

6.3 Hidrología

Los principales arroyos de la SSPM con dirección al océano pacífico, de norte a sur, son el arroyo San Rafael, San Telmo y Santo Domingo (Ruiz-Campos, 1993). El arroyo San Rafael posee tres tributarios: La Fresa, Vallecitos y Agua Zarca; por otro lado, el Arroyo Santo Domingo, considerado el más importante de la sierra, tiene a La Grulla, El Potrero, Valladares, Santa Cruz, La Zanja y San Antonio de Murillos como tributarios (Ruiz-Campos, 1993) (Fig. 12).

El arroyo Santo Domingo recibe varios nombres a lo largo de su curso. En su cabecera se le da el nombre de arroyo San Antonio, el cual después de confluir con el arroyo La Zanja recibe el nombre de San Antonio de Murillos y finalmente es denominado río Santo Domingo después de la confluencia con el arroyo Valladares (Zúñiga-Castillo, 1995). El escurrimiento medio anual de la cuenca del río Santo Domingo es de 70 millones de m³, de acuerdo a los aforos de 27 años (1960-1986) registrado por la Comisión Nacional del Agua en la estación hidrométrica número 6 "Vicente Guerrero" (Zúñiga-Castillo, 1995). Cabe mencionar que el flujo anual promedio de este río durante años secos, entre 1950 y 1977, no superó los 10

millones de m³/año, pero entre 1978 y 1985, éste se incrementó a 180 millones de m³/año (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1983).

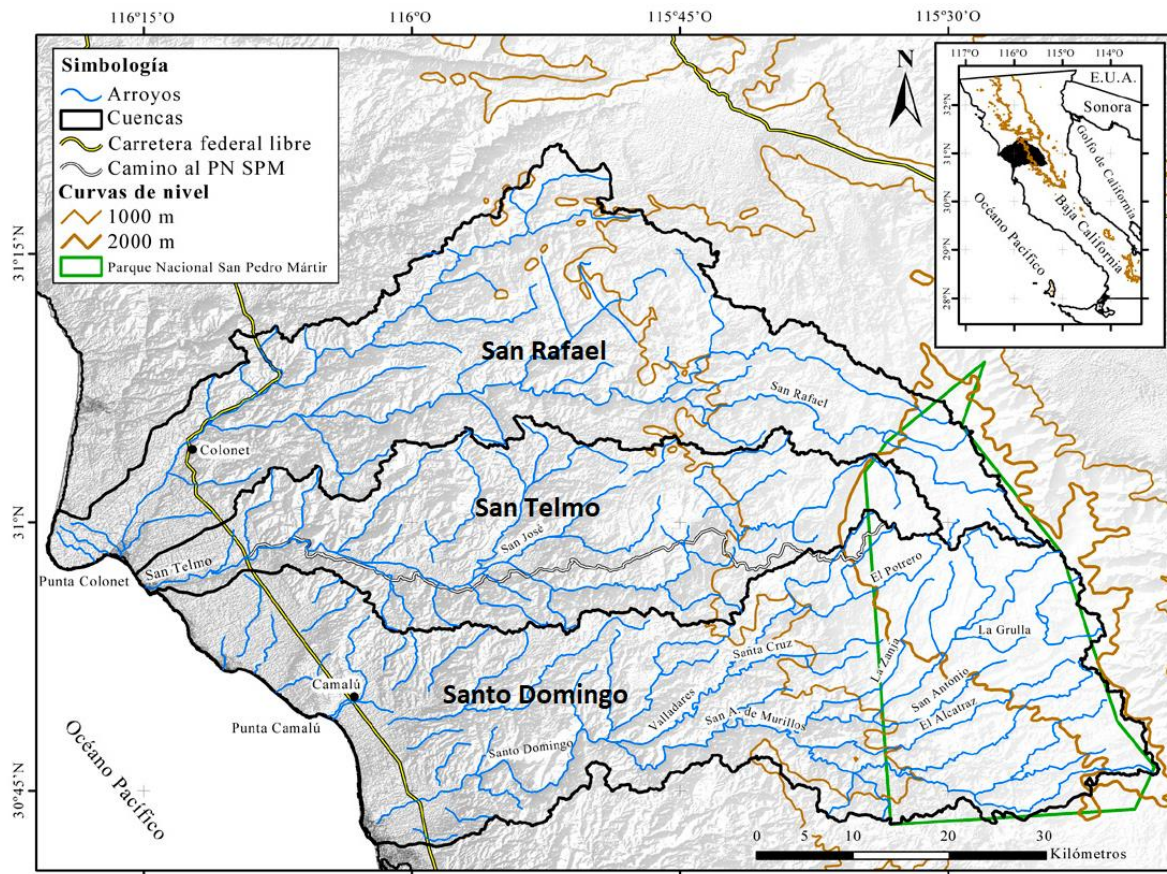


Figura 12. Delimitación de cuencas e hidrología superficial de la vertiente occidental de la sierra San Pedro Mártir. Tomado de Ruiz-Campos (2017).

Estos arroyos son perennes en sus cabeceras e intermitentes en sus cursos medios e inferiores durante la época de sequía (Tamayo, 1962).

Respecto a la profundidad de los arroyos, son someros, sin sobrepasar los 0.5 metros de profundidad, aunque algunas pozas pueden llegar a alcanzar los 1.5 m de profundidad, en especial, aquellas que están debajo de cascadas, formadas por la erosión causada de la corriente o caída del agua del río hacia el sustrato (Ruiz-Campos, 1993).

El Arroyo Santo Domingo es nombrado de varias maneras a lo largo de su curso, conocido como San Antonio en su cabecera, posteriormente al confluir con el Arroyo La Zanja, es recibido con el nombre de San Antonio de Murillos (localidad tipo de la trucha de San Pedro Mártir), y finalmente es nombrado río Santo Domingo después de confluir con el Arroyo Valladares cerca del rancho San Juan (Ruiz-Campos, 1993).

6.4 Climatología

LA SSPM posee un clima sub-húmedo, con una precipitación anual promedio de 400 mm con máximos de 1000 mm, principalmente en la época invernal y una temperatura promedio anual de 7 °C. El origen de las lluvias es de tipo orográfico, provocadas por frentes fríos o ciclones tropicales (Álvarez, 1985).

Respecto a la temperatura ambiental, presenta una alta variabilidad, con mínimos de hasta -12 °C durante la época invernal y máximos de 35 °C en el verano (Reyes-Coca y García-López, 1991; Ruiz-Campos, 1993).

En la SSPM es posible apreciar un gradiente de precipitaciones anual diferente, de acuerdo a la altitud, por ejemplo: (Altitud [A] = 40 msnm; precipitación [P] = 163 mm); Santo Domingo (A = 160 msnm; P = 252 mm); Santa Cruz (A = 999 msnm; P = 304 mm); y San Pedro Mártir (A = 2,080 msnm; P = 518 mm) (Solís-Mendoza, 2016).

6.5 Vegetación

La flora vascular de la SSPM se compone por 500 especies pertenecientes a 251 géneros y 78 familias, de las cuales 453 especies (236 géneros) son nativas y 23 especies y una variedad son conocidas por ser endémicas de esta sierra (Thorne et al., 2010).

Las coníferas son consideradas como los elementos dominantes de la SSPM en elevaciones mayores a los 1,500 msnm, en particular por *Pinus jeffreyi*, alternando su presencia con *Pinus lambertiana*, *Abies concolor* y *Calocedrus decurrens* (Rebman y Roberts, 2012).

Dentro de la SSPM son reconocidas fitosociológicamente cinco pisos de vegetación. De acuerdo con Peinado et al. (1994) son:

Mesotropical: este piso representativo de la región xerofítica mexicana está presente en la vertiente oriental de la SSPM, entre el nivel del mar en el golfo de California y los 800-900 msnm, bajo condiciones de ombroclima árido. Son reconocidas aquí dos comunidades dominantes: *Echinocereus engelmannii*-*Agave deserti* y *Fouquieria splendens*-*Larrea tridentata*.

Inframediterráneo: representado por una franja costera situada entre los paralelos 30 ° y 31 °N, en altitudes menores a los 700 msnm, con dos asociaciones principales (matorral rosetófilo: *Bergerocactus emoryi* y *Agave shawii*, y chaparral: *Rosa minutifolia* y *Aesculus parryi*).

Termomediterráneo: este piso comienza de los 700 msnm, alcanzando en algunas solanas los 1,600 msnm, aunque en laderas de sombra no sobrepasa los 1,200-1,300 msnm. Dentro de esta faja térmica se presentan dos grandes grupos de comunidades: chaparrales y encinares. Los chaparrales están dominados por arbustos esclerófilos y caducifolias por sequía, principalmente por asociaciones climáticas de *Xylococcus bicolor* y *Ornitostaphylos oppositifolia*. Los encinares de *Quercus agrifolia* están condicionados por la aparición de humedad edáfica y ocurre como elementos ribereños o asociados a laderas con acumulación de nieblas.

Mesomediterráneo: es dominado por coníferas heliófilas como *Pinus monophylla* y *P. quadrifolia*, entre los 1,300 y 2,000 msnm, asociado con *Adenostoma sparsifolium* y *Juniperus californica*.

Supramediterráneo: es reconocido por arriba de los 2,000 msnm como formaciones forestales dominadas por grandes coníferas (*Pinus jeffreyi*, *P. contorta*, *Abies concolor* y *Calocedrus decurrens*).

La vegetación asociada a los arroyos de la SSPM forma el componente ribereño, donde es posible encontrar formas arbóreas de afinidad mesófila como *Populus fremontii*, *P. tremuloides*, *Platanus racemosa*, *Salix lasiolepis*, *Prosopis glandulosa* y *Acacia greggii*; formas arbustivas como *Rhus ovata*, *Baccharis sarathroides* y *B. salicifolia*, así como formas herbáceas como *Nasturtium officinale* (= *Rorippa nasturtium-aquaticum*), *Juncus acutus*, *Haplopappus venetus*, *Apium graveolens* y *Mentha arvensis* (Ruiz-Campos, 2017).

6.6 Fauna de vertebrados

Avifauna: Está integrada por aproximadamente 110 especies, 84 géneros y 41 familias (Ruiz-Campos et al., 2004). En la SSPM destacan 17 especies que se reproducen en los hábitats de bosques de coníferas (Kratte, 1991), dentro de las cuales cinco son formas endémicas: Codorniz de Montaña “*Mountain Quail*” (*Oreortyx pictus confinis*), Carpintero Velludo “*Hairy Woodpecker*” (*Picoides villosus hyloscopus*), Paro de Montaña “*Mountain Chickadee*” (*Poecile gambeli atratus*), Saltapalo Enano “*Pygmy Nuthatch*” (*Sitta pygmaea leuconucha*) y el Carbonero Oregonense “*Dark-eyed Junco*” (*Junco hyemalis townsendi*).

Herpetofauna: Se compone por 65 especies, de las cuales dos pertenecen al orden Caudata, nueve especies al orden Salientia, una especie al orden Testudinata, 30 especies al orden Sauria y 26 especies al orden Serpentes (Welsh, 1988). De las cuales, varias especies se distribuyen en los ambientes ribereños y acuáticos de la SSPM, tales como el sapo de arroyo “*arroyo toad*” (*Anaxyrus californicus*), la rana

de patas rojas de California “*California red-legged frog*” (*Rana draytonii*), la tortuga de poza del Pacífico “*Western pond turtle*” (*Emys pallida*), los lacertilios como la lagartija de cerco de la Gran Cuenca “*Great Basin fence lizard*” (*Sceloporus occidentalis biseriatus*) y la lagartija caimán de San Diego (*Elgaria multicarinata webbiai*); la culebra de San Pedro Mártir “*San Pedro Martir garter snake*” (*Thamnophis elegans hueyi*), la culebra de dos rayas “*Two-striped garter snake*” (*Thamnophis hammondi*) y la serpiente de cascabel del Pacífico Sur “*Southern Pacific rattlesnake*” (*Crotalus oreganus helleri*).

Mastofauna: Está compuesta por 57 especies (Guevara-Carrizales et al., 2016; cf. Huey, 1964; Mellink, 1991), de las cuales tres especies pertenecen al orden Insectívora, 17 especies al orden Chiroptera, tres especies al orden Lagomorpha, 22 especies al orden Rodentia, diez especies al orden Carnivora y dos especies al orden Artiodactyla. Sobresalen las formas endémicas como el topo *Scapanus latimanus anthonyi*, los ratones *Microtus californicus hyperythrus*, *Chaetipodus californicus mesopolius* y *Peromyscus truei martirensis*; las ardillas *Tamiasciurus mearnsi* y *Neotamias obscurus obscurus*, así como el murciélago *Myotis evotis milleri* (Mellink, 1991).

Respecto a los mamíferos de tamaño mediano a grande presentes en la SSPM, destacan el mapache (*Procyon lotor psora*), el tejón (*Taxidea taxus berlandieri*), la zorra gris (*Urocyon cinereoargenteus californicus*), el cacomixtle (*Bassariscus astutus octavus*), el zorrillo moteado (*Spilogale gracilis martirensis*), el coyote (*Canis latrans clepticus*), el conejo de cola de algodón (*Sylvilagus audubonii sanctidiegi*), la liebre de California (*Lepus californicus martirensis*), el gato montés (*Lynx rufus californicus*), el puma (*Puma concolor californica*), el venado bura (*Odocoileus hemionus fuliginatus*) y el borrego cimarrón peninsular (*Ovis canadensis cremnobates*).

7. Metodología

Para la elaboración de este estudio de carácter interdisciplinario fue utilizada la metodología denominada FPEIR (Fuerzas motrices-Presión-Estado-Impacto-Respuesta) (Casas-Jiménez et al., 2017). Se analizaron atributos poblacionales y de hábitats de la trucha de San Pedro Mártir, así como aspectos paisajísticos, sociales y amenazas presentes en las localidades estudiadas, todo ello para conocer el estado actual y la tendencia de los sitios implicados. Se realizó un análisis e integración de información generada en estudios previos y aquella obtenida en esta investigación a través de muestreos recientes en el período de 2014-2019.

7.1 Estado de conservación de la trucha endémica *O. m. nelsoni* y sus hábitats, en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, México.

Para la evaluación del Estado (Situación actual del hábitat y estatus poblacional de la especie a analizar) de la subespecie y su hábitat se estudiaron diversos indicadores de ecología poblacional y paisajística en los tres sitios de estudio mediante los métodos descritos en la figura 13, señalando sus respectivos productos a obtener:

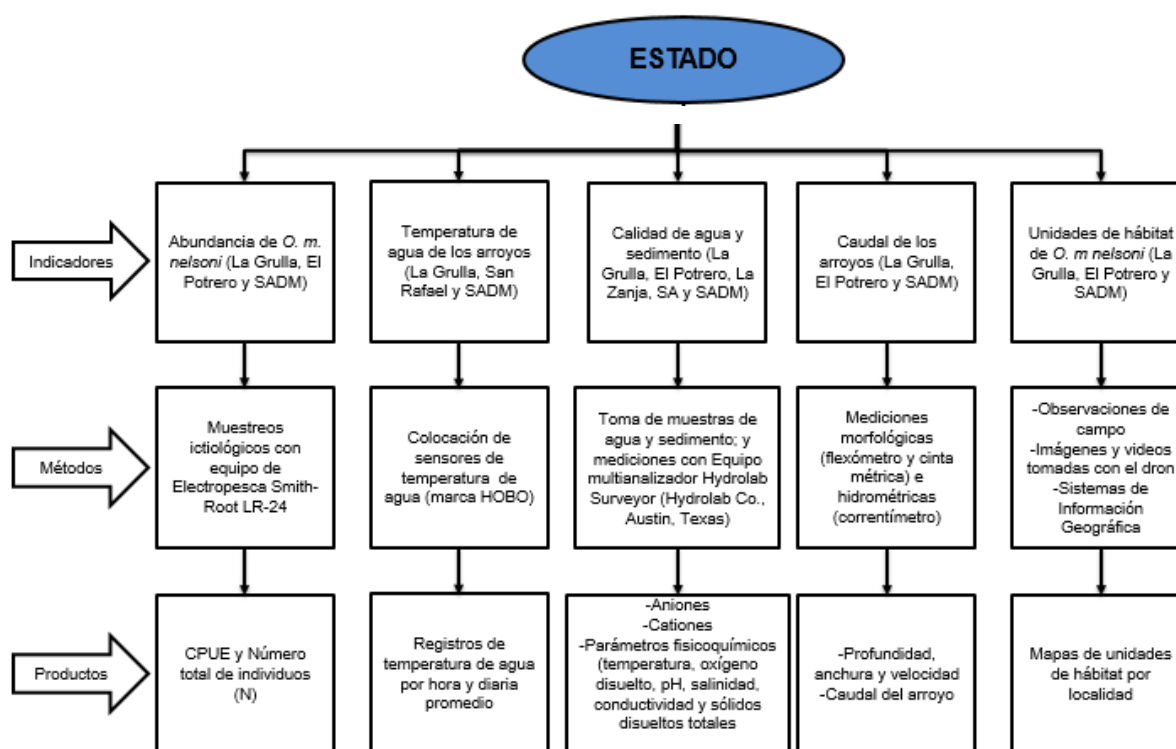


Figura 13. Indicadores de Estado evaluados con su respectivo método y el esperado producto obtenido de cada uno de ellos en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, México.

Las tres etapas del muestreo desarrolladas para la determinación del módulo Estado actual de la población de trucha y sus hábitats fueron basadas en aquellas descritas por Ruiz-Campos (2017) y Ruiz-Campos et al. (2021). Estas tres etapas se realizaron de la siguiente manera: (1) identificación de las unidades de hábitat a través del transecto del arroyo a evaluar. (2) muestreo de truchas en cada una de las unidades de hábitat identificadas en el transecto, con el propósito de determinar la densidad de individuos por metro cuadrado en cada tipo de unidad de hábitat. (3) caracterización fisicoquímica, fisiográfica e hidrométrica de cada unidad de hábitat muestreada.

7.1.1 Temperatura de agua de los sitios de estudio

Las temperaturas del agua se registraron en aquellos sitios donde previamente se había reportado la trucha arcoíris endémica *O. m. nelsoni* (Ruiz-Campos y Pister, 1995; Ruiz-Campos et al., 2014a), en tres elevaciones diferentes en la SSPM (553 msnm en el Arroyo San Antonio de Murillos; 1,220 msnm en Arroyo San Rafael; y 2,080 msnm en Arroyo La Grulla) entre los años 1996 y 2019. Los sitios de La Grulla y San Antonio de Murillos representan el intervalo de distribución altitudinal de esta subespecie (Ruiz-Campos, 2017).

En cada sitio de arroyo se utilizaron de dos a tres termógrafos sumergibles (colgante de la marca HOBO, modelo UA-002-08, ± 0.01 °C, Fig. 14). Cada termógrafo se colocó en el lecho del arroyo, principalmente en una poza sombreada a una profundidad >0.4 m, mismo que se posicionó con un cable de acero inoxidable atado al tronco de un árbol en el banco del arroyo. Los termógrafos fueron programados para registrar la temperatura del agua a intervalos de 1 h durante al menos un año, al final del cual, cada termógrafo se retiró e inmediatamente se reemplazó por otro termógrafo preprogramado para continuar registrando la temperatura del agua (Fig. 15).

La temperatura del agua se midió en dos periodos para La Grulla (1999-2000 y 2015-2019) y San Rafael (1996-1997 y 2014-2015). En el sitio San Antonio de Murillos, la temperatura se midió en un solo periodo, 2014-2015.



Figura 14. Termógrafo sumergible (HOBO Pendant, Modelo UA-002-08) utilizado para el registro de temperatura a intervalos de una hora, en un sitio del arroyo San Rafael, sierra San Pedro Mártir, Baja California, México.



Figura 15. Colocación de los sensores de temperatura de agua HOBO en las diferentes localidades del área de estudio en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, México.

Los registros de temperatura de los termógrafos fueron obtenidos con el software ®HOBOWare, mismos que fueron transferidos a un archivo ®MS Excel 2016 para su análisis e interpretación.

Considerando que temperaturas del agua ≥ 28 °C son conocidas por ser letales para las poblaciones sureñas de trucha arcoíris en Norteamérica (Kammerer y Heppell, 2013a; Matthews y Berg, 1997), se calculó el número total y promedio de horas y días con temperaturas iguales o superiores a 28 °C.

En el sitio de La Grulla, se utilizaron pruebas ANOVA unidireccionales para comparar los valores de temperatura promedio diaria entre los tres años (1999, 2016 y 2017). Por su parte, en el sitio de San Rafael, se utilizó una prueba t de Student para comparar valores promedio diarios de los dos años (1996 y 2014) en los que se realizaron las mediciones (Sokal y Rohlf, 1981). En el sitio de San Antonio de Murillos, no se realizó ninguna comparación estadística porque solo se registró 1 año de mediciones. Las temperaturas promedio diarias del agua en cada sitio se compararon estadísticamente para cada verano en el que se realizó el estudio.

Se utilizaron tres modelos de predicción climática basados en registros de temperatura del agua para predecir las temperaturas en los tres sitios de estudio: el modelo GFDL R30 del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (Delworth et al., 2002); el modelo HadCM3 del Hadley Center, que fue utilizado por la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (Pope et al., 2000; Conde et al., 2011); y el modelo Mote (Mote et al., 2003), que se basa en el análisis de ocho modelos climáticos de la atmósfera oceánica global disponibles a través del Centro de Distribución de Datos del IPCC. Los tres modelos se utilizaron para pronosticar temperaturas para los años 2025 y 2050, con base en el escenario de emisiones A2 (Nakicenovic et al., 2000), y vinculados a la temperatura del agua de los arroyos con el fin de determinar tendencias e identificar los tiempos y lugares en el que estaban presentes temperaturas ≥ 28 °C.

La primera predicción generada con el modelo GFDL R30, se utilizó un aumento de temperatura de 0.6 °C para el año 2025 y 0.95 °C para el año 2050; mientras que,

en la segunda predicción, basada en el modelo HadCM3, se utilizó un aumento de temperatura de 0.45 °C y 0.85 °C para los años 2025 y 2050, respectivamente. Finalmente, el modelo Mote predijo un incremento global de 0.75 °C para el año 2025 y 2.0 °C para el año 2050. Para el modelado predictivo se utilizaron los últimos registros completos de temperatura anual, correspondientes al año 2016 para el arroyo La Grulla, y los años 2014 y 2015 para los arroyos San Rafael y San Antonio de Murillos.

La elevación esperada (msnm) en la Sierra San Pedro Mártir con temperaturas del agua por debajo de la temperatura letal (28 °C) fue estimada para los años 2025 y 2050, basado en los valores promedios (diarios y horarios) generados por los tres modelos arriba citados.

La altitud predicha se calculó con la siguiente fórmula de regresión lineal:

$$y = (mx + n)$$

Donde:

y = altitud calculada (msnm)

x = temperatura promedio (°C)

n = intercepto

m = pendiente de la regresión que indica la tasa de cambio en “y” por cada unidad de cambio en “x”.

Para obtener las constantes “n” y “m” se procedió a la obtención de un sistema de ecuaciones lineales 2x2 (Lehmann, 1986) el cual quedó de la siguiente manera con este ejemplo:

Dato 1.- SADM (553 m, 30.805 °C)

Dato 2.- La Grulla (2080 m, 16.026 °C)

$$\text{Ecuación 1.- } 16.026 \text{ m} + n = 2080$$

$$\text{Ecuación 2.- } 30.805 \text{ m} + n = 553$$

Se multiplican los valores del dato 1 con la ecuación 2 y los valores del dato 2 con la ecuación 1, con el fin de eliminar m y así poder obtener n.

$$\begin{array}{r}
 \cancel{493.672917\text{m}} + 30.805n = 64,073.73 \\
 \cancel{-493.672917\text{m}} - 16.026n = -8,862.1015 \\
 \hline
 14.779n = 55,209.2585 \\
 n = \frac{55,209.2585}{14.779} \\
 n = 3,735.6559
 \end{array}$$

Ya que se obtuvo n, solo faltaría obtener m en la ecuación, para ello, se realizó el siguiente cálculo:

$$16.026m + 3,735.6559 = 2080$$

$$16.026m = 2080 - 3,735.6559$$

$$16.026m = -1,655.6559$$

$$m = \frac{-1,655.6559}{16.026}$$

$$m = -103.310614$$

Ya que obtuvimos los valores de m y n de acuerdo a los valores del dato 1 y dato 2, se procedió a calcular el valor de la altitud cuando la temperatura esté a 28 °C:

$$y = -103.310614(28 \text{ °C}) + 3,735.6559$$

$$y = 842.958708 \text{ msnm}$$

Todos estos cálculos se realizaron para cada una de las fechas analizadas con el software Microsoft Excel Versión 2016.

7.1.2 Composición fisicoquímica del agua

Una medición de la calidad fisicoquímica del agua fue realizada en cada unidad de hábitat presente en los segmentos de arroyo muestreados de cada localidad de estudio (La Grulla, El Potrero y San Antonio de Murillos). Se tomaron mediciones en varios puntos de cada unidad de hábitat. Para ello, se utilizó un equipo multianalizador Hydrolab Scout 2 (Hydrolab Co., Austin, Texas; Fig. 16). Las variables fisicoquímicas medidas fueron temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/l), conductividad (mS/cm), potencial de iones hidrógeno (pH), porcentaje de saturación de oxígeno (%), salinidad (‰) y sólidos disueltos totales (g/l).



Figura 16. Equipo multianalizador Hydrolab Scout 2 utilizado en cada una de las localidades de estudio en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.

Para el análisis de cationes y aniones mayoritarios en el agua, se colectaron muestras de agua en recipientes previamente descontaminados, en tres puntos de cada sitio de arroyo (La Grulla, 2,080 msnm; El Potrero, 950 msnm; San Antonio, 580 msnm; La Zanja, 575 msnm; y San Antonio de Murillos, 553 msnm), efectuando dos repeticiones por punto (Fig. 17). El agua obtenida de cada muestra fue previamente filtrada con filtros de nitrato de celulosa de 0.45 micrómetros para su análisis en el Departamento de Geografía y Geociencias en la Universidad Friedrich Alexander de Erlangen-Núremberg, Alemania, con el propósito de determinar los tipos de composición geoquímica del agua en los arroyos.



Figura 17. Manejo de las muestras de agua en esta investigación, desde la recolección hasta el preparamiento de las mismas antes de su procesamiento en laboratorio.

Los tipos de composición de agua se determinaron con el programa AquaChem 3.70 y se ilustraron mediante diagramas de Stiff y Piper.

Los diagramas de Stiff en este estudio fueron contruidos para cada muestra de agua analizada. Estos diagramas, consideran la concentración de cada anión y catión en meq/L (Fig. 28). Este diagrama permitió visualizar los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y la variación de las relaciones entre cationes o entre aniones. La forma de cada polígono indicó el tipo de agua y del contenido iónico total de la misma, e indirectamente de la conductividad (Gilabert-Alarcón, 2018).

Los diagramas de Piper consisten en diagramas triangulares contruidos por dos triángulos equiláteros, representando la composición porcentual de las concentraciones catiónicas y aniónicas del agua analizada, y un campo central romboidal que indica la composición del agua deducida a partir de los cationes y aniones (Fig. 19).

Por último, el agua de los arroyos estudiados además de ser el hábitat de la trucha endémica, es aprovechada para consumo humano por los pobladores de ranchos aledaños y los valles agrícolas costeros de Camalú y Vicente Guerrero. Por ello, la calidad del efluente se analizó con los parámetros establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 para los principales cationes y aniones estudiados en esta investigación.

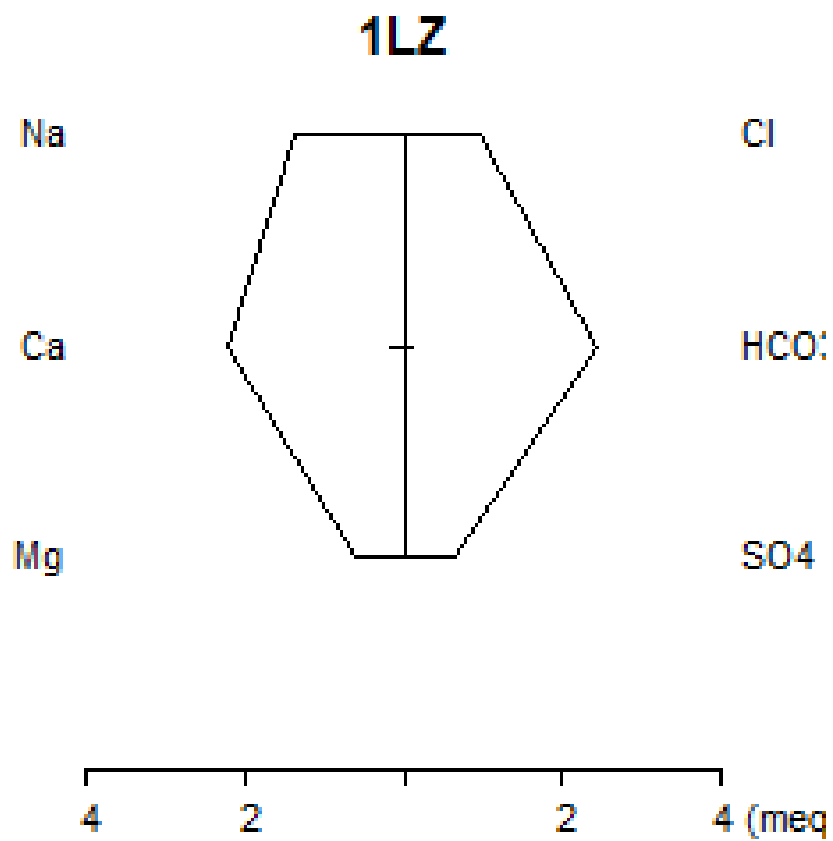


Figura 18. Diagrama de Stiff, representando una muestra de agua en la localidad “La Zanja” recolectada el día 26 de junio de 2019 (elaborado con el programa AquaChem 3.70).

Tipo de aguas

- 1 Sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas
- 2 Bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas
- 3 Cloruradas y/o sulfatadas sódicas
- 4 Bicarbonatadas sódicas
- 5 Magnésicas
- 6 Cálcicas
- 7 Sódicas
- 8 Magnésicas, cálcicas y sódicas
- 9 Sulfatadas
- 10 Bicarbonatadas
- 11 Cloruradas
- 12 Sulfatadas, bicarbonatadas y cloruradas

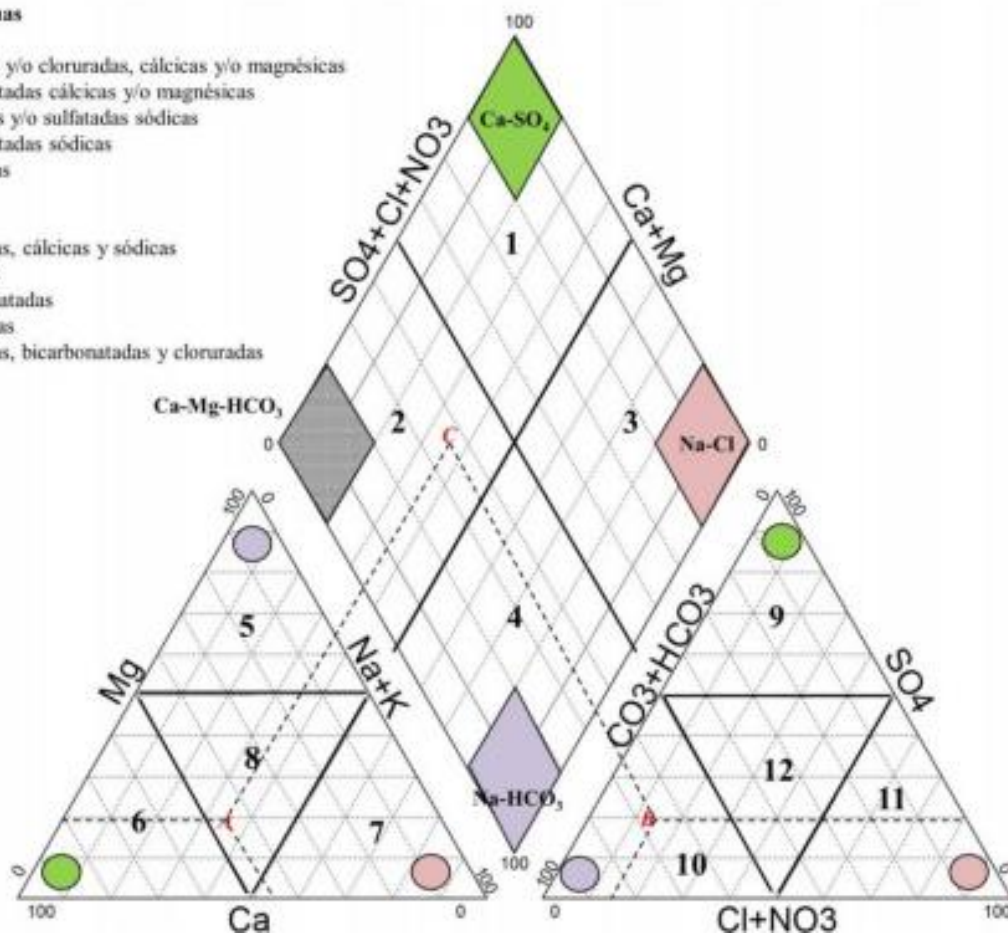


Figura 19. Diagrama de Piper, representando una muestra de agua de tipo bicarbonatada cálcica. Intersecciones muestran una composición de agua bicarbonatada cálcica (Gilabert-Alarcón, 2018).

7.1.3 Variación del caudal en la cuenca del río Santo Domingo

La variación del caudal en la cuenca del río Santo Domingo fue determinada en los tres sitios de arroyo del presente estudio a partir de cinco muestreos (La Grulla: septiembre 2018, noviembre 2018 y abril 2019; El Potrero: mayo 2019; y San Antonio de Murillos: junio 2019). Se realizaron mediciones de la morfología e hidrometría en cada unidad de hábitat del arroyo (sección del arroyo delimitada visualmente sobre la base de características morfológicas e hidrológicas) (cf. Dolloff et al., 1993; Cornell et al., 2008; Ruiz-Campos, 2017; Ruiz-Campos et al., 2021) en las tres localidades de estudio, utilizando los mismos trayectos descritos en el apartado 7.1.4 (La Grulla, 179.1 m; El Potrero, 71.1 m; San Antonio de Murillos, 277 m). Cada sitio de arroyo fue medido en su sección transversal para la anchura del espejo de agua, así como la anchura y pendiente de los bancos. En cada sección transversal se midió a intervalos de 30 cm la profundidad y velocidad de corriente (Fig. 20) con un flexómetro y un correntómetro (modelo Swoffer 2100), respectivamente (Fig. 21).

La tasa de descarga o flujo de los arroyos estudiados fue calculada con la ecuación de Hynes (1972), la cual se define como:

$$Q = (W \times D \times V) \times CF$$

Donde,

Q = tasa de descarga (m^3/s)

W = ancho promedio del arroyo (m)

D = profundidad promedio (m)

V = velocidad promedio de la corriente (m/s)

CF = constante de fricción en sustratos arenosos (0.9) y sustratos rocosos (0.8).

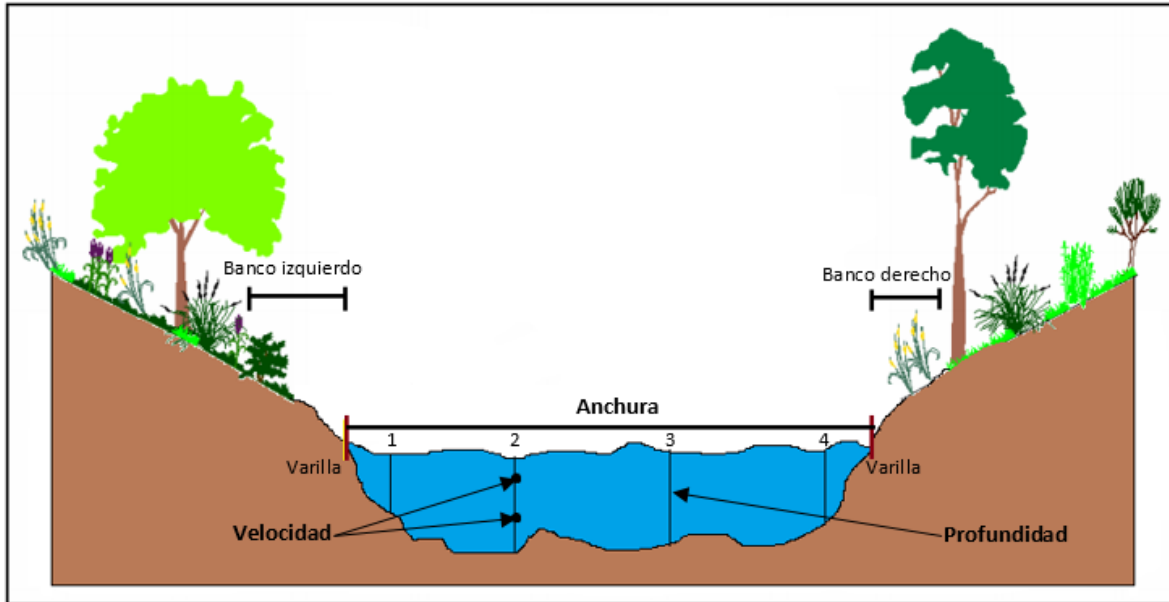


Figura 20. Mediciones morfológicas y morfométricas realizadas en cada unidad de hábitat identificada en las localidades de estudio de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.



Figura 21. A) Flexómetro y B) correntómetro utilizados en las localidades de estudio de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.

Los valores de flujo de cada sitio de arroyo fueron comparados con evaluaciones previas de estos mismos sitios reportadas por Ruiz-Campos (1993, 2017), con el propósito de cuantificar la variación del caudal que ha habido en los últimos 30 años, todo ello para la futura determinación del caudal ecológico mínimo para mantener la conexión de los ecosistemas acuáticos y riparios donde habita esta trucha endémica.

Para documentar los cambios en los niveles inundación de uno de los sitios de distribución de la trucha de San Pedro Mártir, como lo es La Grulla, se realizó una comparación histórica en un periodo estacional similar durante los últimos 30 años (Ruiz-Campos, 1993, 2017; Ruiz-Campos y Pister, 1995). El análisis consistió en la comparación en los niveles de flujo e inundación de una misma poza en diferentes años mediante la toma de imágenes fotográficas.

7.1.4 Distribución y abundancia histórica y actual de la trucha *O. m. nelsoni*

La estimación de la abundancia (CPUE) histórica y actual de la trucha *O. m. nelsoni* en la cuenca del río Santo Domingo, fue basada en muestreos estandarizados con equipo de electropesca (Smith-Root LR24, 400-600 volts de potencia de descarga; Fig. 22) en transectos de arroyo de longitud variable en las siguientes localidades y fechas: La Grulla (septiembre 2014, agosto 2015, septiembre 2016 y abril 2017, longitud promedio de 179.1 m), San Antonio de Murillos (octubre 1995, enero 2001, septiembre 2010, mayo 2014 y abril 2015, longitud promedio 277 m) y El Potrero (septiembre 1995, enero 2001 y mayo 2019, longitud promedio 71.1 m).



Figura 22. Equipo de electropesca utilizado para la captura de trucha de San Pedro Mártir en el sitio de arroyo El Potrero, Baja California, México.

En cada extremo de unidad de hábitat se colocó transversalmente una red de bloqueo (luz de malla de 3.5 mm) para evitar la salida o entrada de los individuos. Dos pasos con electropesca fueron realizados en cada unidad de hábitat. Las truchas inmovilizadas fueron recolectadas con una red de mano y colocadas en cubetas con agua del mismo arroyo. En el campo, los ejemplares recolectados fueron medidos en longitud (longitud patrón [LP] y longitud total [LT] en milímetros [mm], precisión 0.5 mm) y en peso (gramos, precisión 0.1), y posteriormente retornadas a la unidad de hábitat donde fueron capturados (Fig. 23).

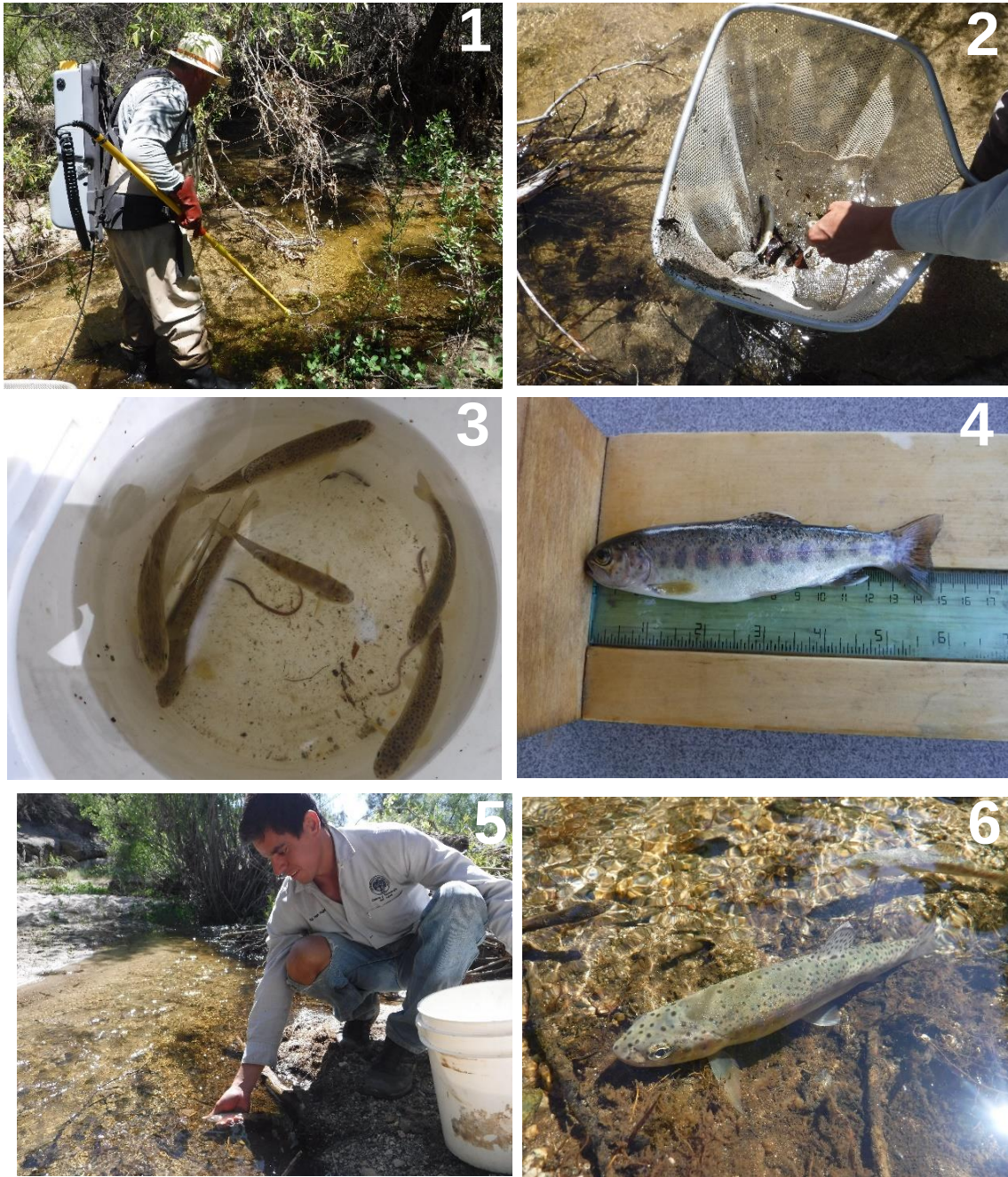


Figura 23. Etapas en el proceso de captura y obtención de datos biométricos de individuos de la trucha arcoíris de San Pedro Mártir, en el sitio de arroyo El Potrero, Baja California, México. Fotografías por Iván Alejandro Meza Matty (1, 4 y 6) y Gorgonio Ruiz-Campos (2, 3 y 5).

La abundancia de la trucha de San Pedro Mártir en cada una de las localidades de la cuenca del río Santo Domingo fue estimada como captura por unidad de esfuerzo (CPUE). Esta expresión estandarizada permite comparar de modo espacio-temporal la abundancia de esta trucha en el área de estudio. La CPUE (Nielsen, 1983) de la trucha de San Pedro Mártir es calculada como número de individuos capturados/segmento de 200 m de arroyo muestreado. De igual manera, la densidad de truchas en los sitios de estudio fue expresada en número de individuos por metro cuadrado, la cual es obtenida considerando la superficie de arroyo muestreado. Dicha superficie se estimó considerando la longitud del trayecto muestreado (m) por el ancho promedio del mismo (m).

7.1.5 Identificación de las unidades de hábitat (evaluación del patrón de paisaje)

La distribución espacial de la trucha de San Pedro Mártir fue determinada por métodos de análisis espacial, los cuales fueron integrados en el Sistema de Información Geográfica Quantum GIS versión 3.8.1. Las coordenadas de las localidades estudiadas fueron documentadas sobre una imagen georreferenciada Landsat/Copernicus del área de estudio, misma que fue tomada el 24 de diciembre de 2019 vía Google Earth, con una resolución de 15 x 15 m. Estas coordenadas obtenidas fueron relacionadas con la abundancia de la trucha con la finalidad de identificar el tipo de distribución de la población, basado en el criterio de López y Becerril (2000), en el cual establece que *“Una metapoblación es capaz de adquirir casi cualquier arreglo espacial dependiendo del tipo de organismo que se trate y del entorno”*. Así mismo, se utilizó el ámbito hogareño promedio conocido de la trucha de San Pedro Mártir (14.6 m) (Ruiz-Campos y Villalobos-Ramírez, 1991) para la identificación de poblaciones locales. De acuerdo con diferentes investigaciones (Gerking, 1953; Allen, 1969; Ruiz-Campos, 2017), los salmónidos poseen un comportamiento territorial en los ríos y arroyos donde habitan, dichos territorios son pequeños espacios ocupados y defendidos por un mismo individuo (Cargill, 1980). La trucha *O. m. nelsoni* prefiere los sitios con menor velocidad de corriente y de mayor profundidad (pozas >30cm), los cuales proporcionan una mayor cobertura, protección y disponibilidad de alimento (Ruiz-Campos, 2017).

Para cada sitio de estudio fue seleccionado un segmento de arroyo (La Grulla, 179.1 m; El Potrero, 71.1 m; San Antonio de Murillos, 277 m) para la identificación de unidades de hábitat presentes. Estas unidades de hábitat se definen como las secciones del arroyo delimitadas visualmente sobre la base de características morfológicas e hidrológicas (cf. Dolloff et al., 1993; Cornell et al., 2008; Ruiz-Campos, 2017; Ruiz-Campos et al., 2021), mismas que fueron basadas en aquellas descritas para los peces salmónidos en los drenajes del Pacífico de Norteamérica (USDA-USFS, 1990; Bain y Stevenson, 1999; Ruiz-Campos et al., 2008) (Tabla 2 y Figura 24).

Tabla 2. Descripción de los tipos de hábitat registrados y las siglas utilizadas para su identificación en las localidades de estudio en la cuenca del río Santo Domingo de acuerdo a la guía de campo para la tipificación de hábitat de salmónidos (USDA-USFS, 1990).

Poza/Corriente	Siglas USDA-USFS	Siglas en español	Nombre completo	Características
Poza	MCP	PEC	Poza de erosión central	Grandes pozas formadas por erosión al centro del canal. La fosa de erosión abarca más de 60% del diámetro del canal. La velocidad del agua es lenta y el sustrato es altamente variable.
Poza	STP	PES	Poza de escalón	Una serie de pozas separadas por pequeños rápidos o cascadas.
Poza	CCP	PCC	Poza de canal de confluencia	Grandes pozas formadas en la confluencia de dos o más canales. Este tipo puede deberse a hundimientos, obstrucciones laterales o formas en las intersecciones del canal. La velocidad y la turbulencia son generalmente mayores que las de otros tipos de pozas
Poza	LSP	PEL	Poza de erosión lateral	Formada por el flujo que recae en las rocas que crean una obstrucción parcial del canal. La erosión asociada está confinada a menos del 60% del ancho del canal.
Corriente	GLD	CFL	Corriente de flujo laminar	Fluye de velocidades bajas a moderadas, carente de turbulencias marcadas. El fondo del canal es amplio y uniforme, cuyo sustrato puede variar de cantos rodados, grava o arena.
Corriente	RUN	COR	Corriente	Fluye rápidamente sin obstáculos grandes para el flujo, con poca agitación en la superficie, a menudo aparece como rápidos inundados, el sustrato típicamente es grava, pero también pueden ser guijarros o rocas.
Corriente	SRN	COE	Corriente escalonada	Una secuencia de rápidos separados por escalones cortos, el sustrato es canto rodado y rocas.

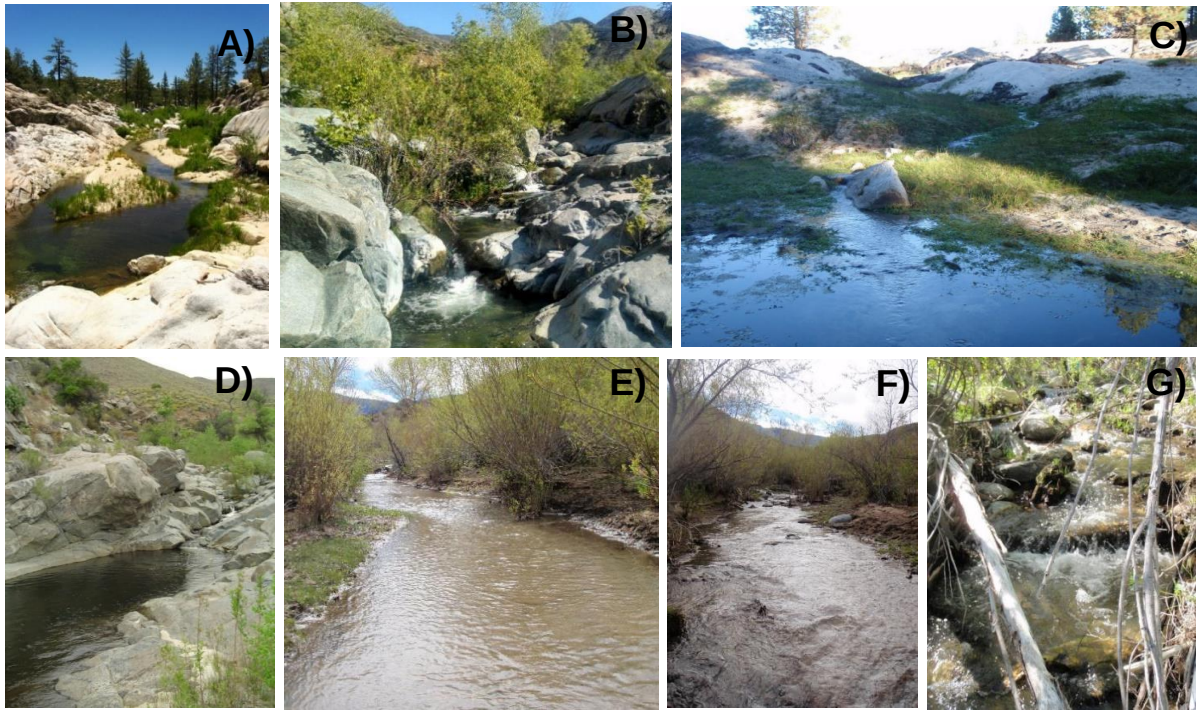


Figura 24. Tipos de unidades de hábitat donde habita la trucha endémica *Oncorhynchus mykiss nelsoni* en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México. A) PEC = Poza de erosión central, B) PES = Poza de escalón, C) PCC = Poza de canal de confluencia, D) PEL = Poza de erosión lateral, E) CFL = Corriente de flujo laminar, F) COR = Corriente, G) COE= Corriente escalonada.

Para la caracterización y análisis de unidades de hábitat para la evaluación del paisaje, es primordial utilizar una escala que sea capaz de diferenciar que características hay entre cada unidad (Escofet, 1994). Por ello, en este trabajo, se realizó un análisis fotográfico, producto de la toma de fotografías y videos por medio de una aeronave no tripulada (Dron, modelo Phantom 4 Pro V2.0), análisis de imágenes del portal de Google Earth derivadas de los satélites Landsat/Copernicus tomadas el 22 de junio de 2019, y observaciones de campo en cada una de las localidades de estudio. Toda la información paisajística recabada fue integrada en un Sistema de Información Geográfica, usando el software Quantum GIS versión 3.8.1. Este último procedimiento permitió identificar las coberturas y tipos de hábitat más importantes para la distribución de la trucha en el área de estudio.

Posteriormente, fue zonificado cada uno de los sitios de muestreo en este estudio en el software Quantum GIS versión 3.8.1, dependiendo de las características mencionadas en la guía para los peces salmónidos en los drenajes del Pacífico de Norteamérica, con el propósito de obtener las unidades de hábitat, para llevar a cabo una evaluación y caracterización de las mismas. Para la representación gráfica de las unidades de hábitat en las secciones de los arroyos estudiados se confeccionaron mapas esquemáticos utilizando el criterio de Dolloff et al. (1993).

Como indicadores en este apartado se utilizaron las variedades de hábitat, la conectividad y la distribución potencial de la trucha endémica, todas ellas calculadas para cada unidad de hábitat, para la obtención de los indicadores de estado.

Para la obtención de las variedades del hábitat se determinó el primer término, el indicador Número de Parches (PN) la cual es la cantidad de parches de una misma cobertura (Leitao et al., 2006), cuya fórmula es:

$$PN = \sum_{i=1}^n pi$$

Donde, Pi = Tipo de parches i .

Posteriormente, la Conectividad, fue estimada con base en la métrica del paisaje ENN (Distancia euclidiana del vecino más cercano), propuesta por Leitao y colaboradores (2006), la cual es la distancia de un parche a otro de la misma cobertura. Dicha métrica está dada por la fórmula:

$$ENN_{MN} = \frac{\sum_{j=1}^{n^1} bij}{n^1 i}$$

Donde, bij = Distancia al parche más cercano de la misma cobertura tipo i a un parche específico j y $n^1 i$ = Número de parches correspondientes a la misma unidad de hábitat.

Por último, para el tercer indicador, la distribución potencial (DIPOT), se relacionó la unidad de hábitat con la abundancia absoluta de la trucha de San Pedro Mártir. Con el método de Weitendorf propuesto por Turskis et al. (2009), donde fueron normalizados los datos de abundancia como captura por unidad de esfuerzo (CPUE).

$$by = \frac{ay - \min ay}{\max ay - \min ay}$$

Donde, by = CPUE, ay = Valor a normalizar, $\max ay$ = Valor máximo de los datos y $\min ay$ = Valor mínimo de los datos.

El anterior método fue utilizado para ponderar las diferentes unidades de hábitat y la abundancia de la trucha de San Pedro Mártir. Para clasificar la DIPOT, fueron tomados como criterios los puntos de abundancia de individuos de trucha de San Pedro Mártir en una determinada unidad de hábitat, durante las recolectas más recientes en las localidades estudiadas (La Grulla, El Potrero y San Antonio de Murillos) y el ámbito hogareño de la trucha endémica (Ruiz-Campos y Villalobos-Ramírez, 1991). Con los mencionados criterios se obtuvo el valor de DIPOT para cada una de las unidades de hábitat.

7.2 Fuerzas Motrices, Presión, Impacto y Respuesta

Para evaluar las Fuerzas Motrices (Condiciones ambientales, sociales, demográficas y económicas que influyen significativamente las presiones sobre el medio ambiente), Presión (Actividades humanas o naturales que causan o pueden causar problemas en el medio ambiente), Impacto (Consecuencias de los cambios en el estado del medio ambiente o en la población) y Respuesta (Acciones que se están llevando a cabo para la mitigación o disminución de las problemáticas existentes y mejora del estado de la trucha y sus hábitats) se estudiaron diversos indicadores en los tres sitios de estudio en la cuenca del río Santo Domingo, mediante los métodos descritos en la figura 25 con sus respectivos productos a obtener. El análisis documental consistió en la recopilación de información previa del área de estudio y de aquella derivada del objetivo específico 7.1 del presente estudio. Como resultado de lo anterior se procedió a confeccionar un análisis de amenazas para identificar cuáles son los impactos y sus fuentes en el área de estudio. Por último, se procedió a realizar un análisis de riesgo con la herramienta FISK (Freshwater Fish Invasiveness Scoring Kit) para identificar cuáles especies ícticas exóticas reportadas en la región noroeste de Baja California (Ruiz-Campos et al., 2014b) podrían representar un mayor riesgo, ya que, a futuro, de acuerdo con Ruiz-Campos (2017) se prevé aumente la temperatura del agua en las localidades del área de estudio y con ello, presentar condiciones óptimas para otras especies ícticas.

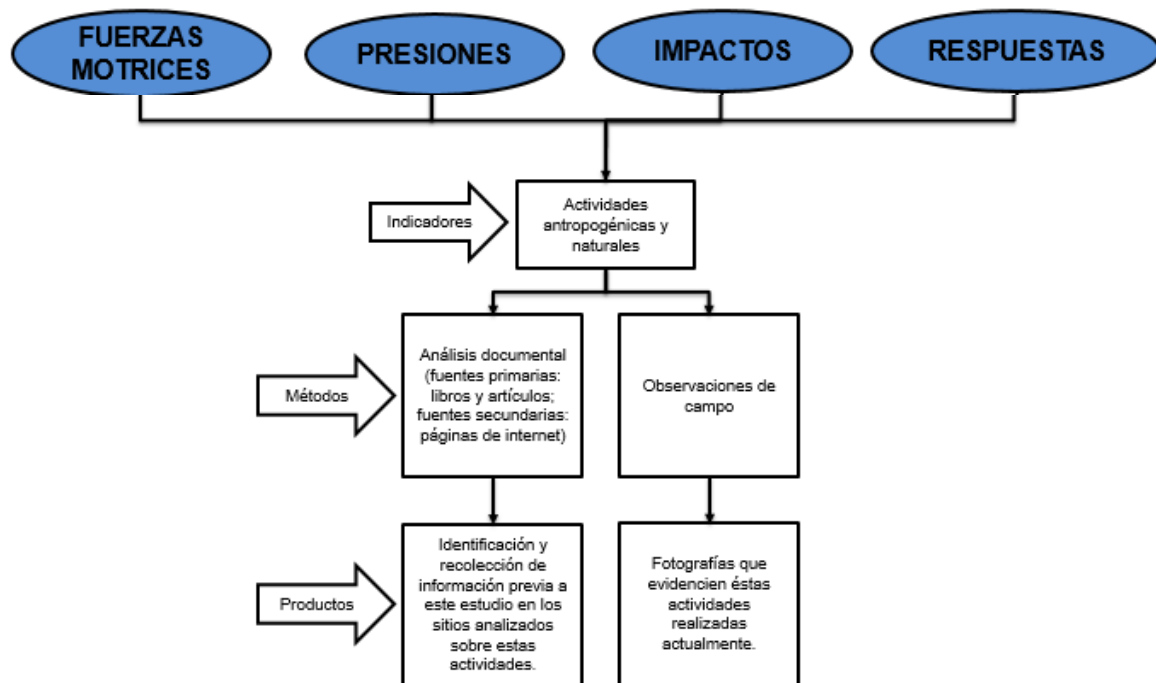


Figura 25. Indicadores de Fuerzas motrices, Presión, Impacto y Respuesta evaluados con su respectivo método y el esperado producto obtenido de cada uno de ellos analizados en el área de estudio.

7.2.1 Análisis documental

El término análisis documental es descrito por Dulzaides-Iglesias y Molina-Gómez (2004) como el conjunto de operaciones intelectuales, las cuales buscan representar los documentos de una manera sistemática para facilitar la recuperación de su información.

Es necesario realizar un análisis documental previamente a una investigación, con el fin de elegir que documentos serán relevantes para cierto perfil de nuestro interés, a partir de una estructura de datos que responda a la descripción general de los elementos que conformarán dicho análisis. Incluye además la descripción bibliográfica (autor, título, datos de edición, etc.) y la descripción del contenido de los términos más significativos (Dulzaides-Iglesias y Molina-Gómez, 2004).

En el presente estudio, se eligieron aquellos documentos cuya información nos indicaba evidencia de alguna actividad antropogénica en el sitio de estudio previa a esta investigación. Esta elección fue obtenida a partir de la búsqueda documental en fuentes primarias: libros y artículos científicos; y fuentes secundarias (páginas de Internet).

7.2.2 Método “La planificación para conservación de los sitios” (Andrade et al., 1999).

En este apartado se aplicó el método propuesto por The Nature Conservancy “La planificación para la conservación en sitios” el cual incluye la identificación de los objetos de conservación, la identificación de los impactos y sus fuentes, la evaluación de los grupos o individuos que hacen uso de los recursos y el desarrollo de estrategias de conservación para los impactos y sus fuentes (Andrade et al., 1999)

Como resultado de este análisis, fue realizada una matriz numérica con coeficientes de ponderación, con el fin de priorizar las amenazas encontradas en este estudio. Dicha ponderación fue dividida en cuatro categorías: 4 (muy alto), 2 (alto), 1 (medio)

y 0.5 (bajo). Para la construcción de la matriz, en primera instancia fueron evaluados los sistemas de conservación tomando en cuenta los siguientes criterios para estos atributos:

Contribución al macroecosistema: es la importancia para el sistema global, un valor de 4 es una contribución muy importante, 2 es una contribución importante, 1 es poca contribución, y 0.5 equivale a casi ninguna contribución.

Rareza: nos indica el reconocimiento de la presencia de especies en peligro de extinción o amenazadas; ésta se pondera con 4 si está en peligro de extinción, 2 está amenazada, 1 está vulnerable, y 0.5 está indeterminada.

Calidad: Es el estado de conservación del sistema, un valor de 4 se refiere a uno de los mejores o únicos ejemplos de conservación del sistema a escala mundial o macrorregional, 2 si es un buen ejemplo de este sistema en el mundo o macrorregión, 1 si es un ejemplo promedio de este sistema en el mundo o macrorregión, y 0.5 si es un ejemplo no destacado de este sistema a escala mundial o macrorregional.

Por último, el valor como herramienta o carisma: es tomado el valor potencial económico, político, ecoturístico y educacional, además de la presencia de especies bandera; un valor de 4 en el caso de ser muy importante o potencialmente importante, 2 si es útil o potencialmente útil, 1 si tiene un valor limitado, y 0.5 si su valor es escaso. El valor para el objeto de conservación es obtenido promediando la puntuación de cada atributo.

Posteriormente fueron evaluados los impactos utilizando las perspectivas de severidad (que está causando el impacto) y el alcance (que está afectando el impacto) con los siguientes criterios:

Severidad: un valor de 4 se refiere a la destrucción o eliminación de ese sistema, 2 a la degradación significativa de ese ecosistema, 1 para alguna degradación del sistema, y 0.5 para un deterioro leve del sistema.

Alcance: se asignó 4 a todo el sistema, 2 a buena parte del sistema, 1 a algunas partes del sistema, y 0.5 a partes pequeñas o aisladas del sistema. El valor de los impactos se obtiene del promedio de estas dos perspectivas.

Por último, las fuentes fueron evaluadas con las contribuciones actuales y futuras de los impactos, basado en los siguientes criterios:

Contribución actual: un valor de 4 cuando ésta representa la principal causa de este impacto, 2 a una causa adicional e importante de este impacto, 1 a una causa menor de este impacto, y 0.5 a una causa irrelevante de este impacto.

Contribución futura: un valor de 4 en el caso de llegar a ser la causa principal de este impacto, 2 si será una causa adicional e importante de este impacto, 1 si será una causa menor de este impacto, y 0.5 si no contribuirá en forma significativa a este impacto. El valor de la fuente se obtuvo del promedio de la contribución actual y futura.

7.2.3 Análisis de riesgo (FISK)

Debido a que la introducción de especies ícticas exóticas es una de las mayores amenazas a futuro en estos sitios, se realizó un análisis de riesgo con la herramienta de identificación de riesgos para especies exóticas (FISK por sus siglas en inglés) (Fig. 26). Este algoritmo fue desarrollado por el Centre for Environment Fisheries & Aquaculture Science del Reino Unido (CEFAS). Este tipo de análisis es un protocolo de identificación de riesgo útil para identificar que especies presentan potencial invasor, ayudando a facilitar el acceso a las normatividades y estrategias a la prevención de invasiones por especies exóticas invasores (EEIs) (Baker et al., 2008). Por lo cual, este análisis de riesgo fue implementado en esta investigación para diferentes especies ícticas exóticas, que pueden representar un riesgo a futuro, debido al posible cambio de temperatura del agua como consecuencia del cambio climático (Rieman y Isaak, 2010).



Figura 26. Diseño de la herramienta FISK, utilizada para realizar el análisis de riesgo en esta investigación.

Esta herramienta se compone por 49 preguntas secuencialmente relacionadas con la biogeografía, biología y ecología de la especie a analizar, requiriendo cada pregunta un nivel de confianza (medición de certeza de la respuesta) y su respectiva justificación (Copp et al., 2009). A partir de las respuestas calibradas, una puntuación numérica es calculada utilizando los siguientes niveles de umbrales:

Aceptado (<0 = bajo riesgo)

Evaluable (1-18 = riesgo medio)

Rechazado (≥ 19 = alto riesgo)

Para la evaluación del objetivo específico 7.2 en este estudio, los indicadores que se tomaron en cuenta fueron los impactos al sistema y la fragmentación. El primer indicador fue obtenido multiplicando los impactos y sus fuentes, mientras que el segundo indicador se obtuvo haciendo uso de la métrica del paisaje Proximity (PROX) (Leitao et al., 2006).

La métrica PROX se obtiene realizando una circunferencia de una determinada distancia (metros), tomando un parche objetivo como centro (parche con mayor densidad poblacional de la unidad de hábitat a analizar). A continuación, se dividió el área del parche más cercano al parche objetivo (de la misma zona) entre la distancia de los mismos, obteniendo un promedio de todos los valores por unidad. La siguiente fórmula presenta lo dicho anteriormente:

$$PROX_{MN} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{a_{ijs}}{b_{ijs}^2}}{n_1}$$

Donde, a_{ijs} = Área del parche más cercano, b^2_{ijs} = Distancia entre el parche más cercano y el parche objetivo y n_1 = Total de parches correspondientes a la misma cobertura.

7.3 Construir y analizar el modelo FPEIR durante esta investigación

A partir de los indicadores de fuerzas motrices, presión, estado, impacto y determinar qué acciones (respuesta) se están llevando a cabo para disminuir/mitigar las fuerzas motrices, presión, impacto y mejorar el estado de la especie evaluada y sus hábitats dentro del área de estudio, fue construido el modelo FPEIR en esta investigación, el cual fue integrado como se presenta en la figura 27:

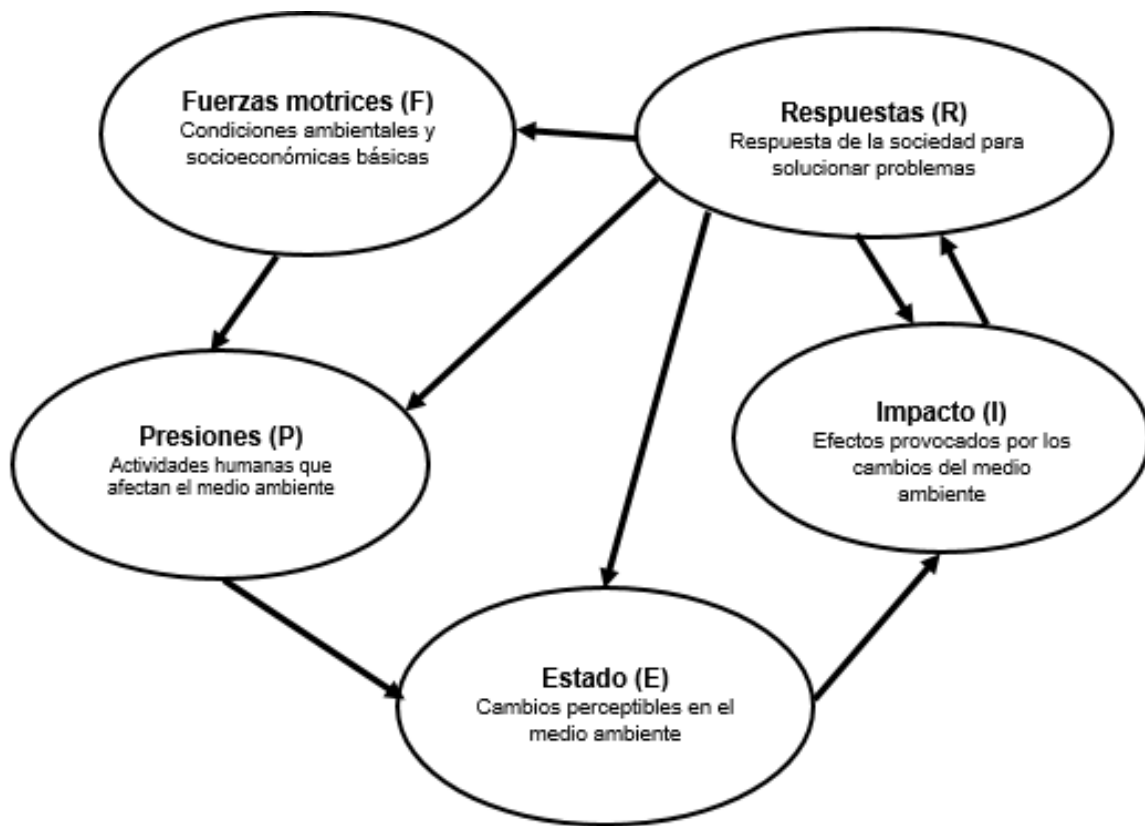


Figura 27. Esquema de marco de referencia Fuerzas motrices-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (FPEIR) (Smeets y Wetering, 1999).

7.4 Propuesta de conservación y manejo integral

Después de haber analizado y evaluado cada uno de los indicadores utilizados y construido el modelo FPEIR perteneciente al área de estudio, se procedió a proponer diversas propuestas de manejo con el objeto de disminuir/mitigar las fuerzas motrices, presión, impacto y mejorar el estado de la especie evaluada y sus hábitats dentro del área de estudio.

7.4.1 Mapa con el índice EstPre

Primeramente, con el método de Weitendorf (Turskis et al., 2009) los valores de los indicadores de presión y estado fueron normalizados, con la finalidad de ser utilizados en el índice de Presión y Estado (PreEst), el cual se aplicó para cada localidad. La fórmula utilizada de dicho índice fue la siguiente:

$$PreEst = \sum Estado + \sum Presión$$

Al obtener los valores fue elaborado un mapa en el Sistema de Información Geográfica Quantum GIS versión 3.8.1 para visualizar espacialmente el resultado de este índice. Así mismo, se generaron tres clasificaciones (Alta, Media y Baja) en dicho SIG para la identificación de la calidad del estado actual de los sitios de estudio.

7.4.2 Actores potenciales

Una matriz de clasificación de actores potenciales para el manejo del área de estudio fue elaborada con base en el criterio de Sorensen et al. (1992). Esta clasificación fue dividida en actores locales, regionales, nacionales e internacionales; siendo estos actores: funcionarios públicos, agencias de gobierno, instituciones de asistencia, sector privado, comunidad científica, OSC's y vecinos.

7.4.3 FODA

Así mismo, un análisis FODA fue confeccionado con el propósito de identificar las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas a nivel sistema, tomando en cuenta las recomendaciones dadas por Blake et al. (2005). Las fortalezas son las características que dan calidad al sistema. Las oportunidades son las situaciones favorables que pueden realizarse para mejorar o mantener el estado del ambiente. Las debilidades son las características que alteran o mantienen una baja calidad del sistema. Y las amenazas son las acciones que probablemente provoquen una disminución en la calidad del sistema, hasta incluso la desaparición del mismo.

7.4.4 Estrategias de conservación

Por último, fueron tomados del análisis de amenazas los impactos categorizados para la realización de las propuestas de manejo a nivel localidad, las cuales fueron descritas por un proyecto para cada impacto. Dentro de cada proyecto propuesto, los responsables, las actividades y la priorización fueron listados. Finalmente, para las propuestas a nivel sistema (Cuenca del río Santo Domingo) se tomaron en cuenta las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del análisis FODA elaborado en esta investigación, las cuales incluyen lo especificado anteriormente.

8. Resultados

8.1 Estado de la trucha de San Pedro Mártir y su hábitat

8.1.1 Temperatura de agua de los sitios de estudio

Arroyo La Grulla.

En el sitio de estudio en el arroyo La Grulla ubicado a 2,080 msnm, la temperatura del agua en intervalos de 1 hora cada día, mostró un patrón de variación similar para cada año (Figura 28A). La temperatura más baja ($0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$) se registró el 23 de enero de 2017, mientras que la temperatura más alta ($17\text{ }^{\circ}\text{C}$) se registró el 8 de septiembre de 2015. La temperatura promedio durante los años 2015 a 2019 fue de $10.36 \pm 4.09\text{ }^{\circ}\text{C}$. No se registraron temperaturas $\geq 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ en ningún momento durante este periodo.

La comparación de las temperaturas promedio diarias del agua entre dos periodos (junio de 1999-mayo de 2000 y agosto de 2015-abril de 2019) se muestra en la figura 28B. La temperatura media diaria más baja en el primer periodo ($5.56\text{ }^{\circ}\text{C}$) se calculó para el 8 de marzo de 2000 y la más alta ($14.91\text{ }^{\circ}\text{C}$) para el 13 de julio de 1999. En lo que respecta a la temperatura promedio durante dicho periodo $11.91 \pm 1.73\text{ }^{\circ}\text{C}$. La temperatura promedio diaria del agua más baja en el segundo periodo ($0.52\text{ }^{\circ}\text{C}$) correspondió al 21 de enero de 2017 y la más alta ($16.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) al 31 de julio de 2016, mientras que la temperatura promedio durante este periodo fue $10.36 \pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Una comparación de las temperaturas calculadas en los dos periodos (Figura 28B) muestra un mayor intervalo de variación de las temperaturas en el periodo agosto de 2015-abril de 2019, registrando una mayor diferencia en las temperaturas promedio diarias calculadas para las diferentes estaciones del año.

El análisis estadístico de la temperatura del agua en la estación de verano, con base en los valores diarios promedio obtenidos en los sitios de estudio, fue como sigue: En el sitio de La Grulla, la temperatura diaria promedio fue significativamente diferente según el año (1999: promedio = $13.77 \pm 0.44\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2016: promedio = $15.39 \pm 0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$, y 2017: promedio = $15.34 \pm 0.53\text{ }^{\circ}\text{C}$; ANOVA 1 vía, $F = 162.03$, $P < 0.001$).

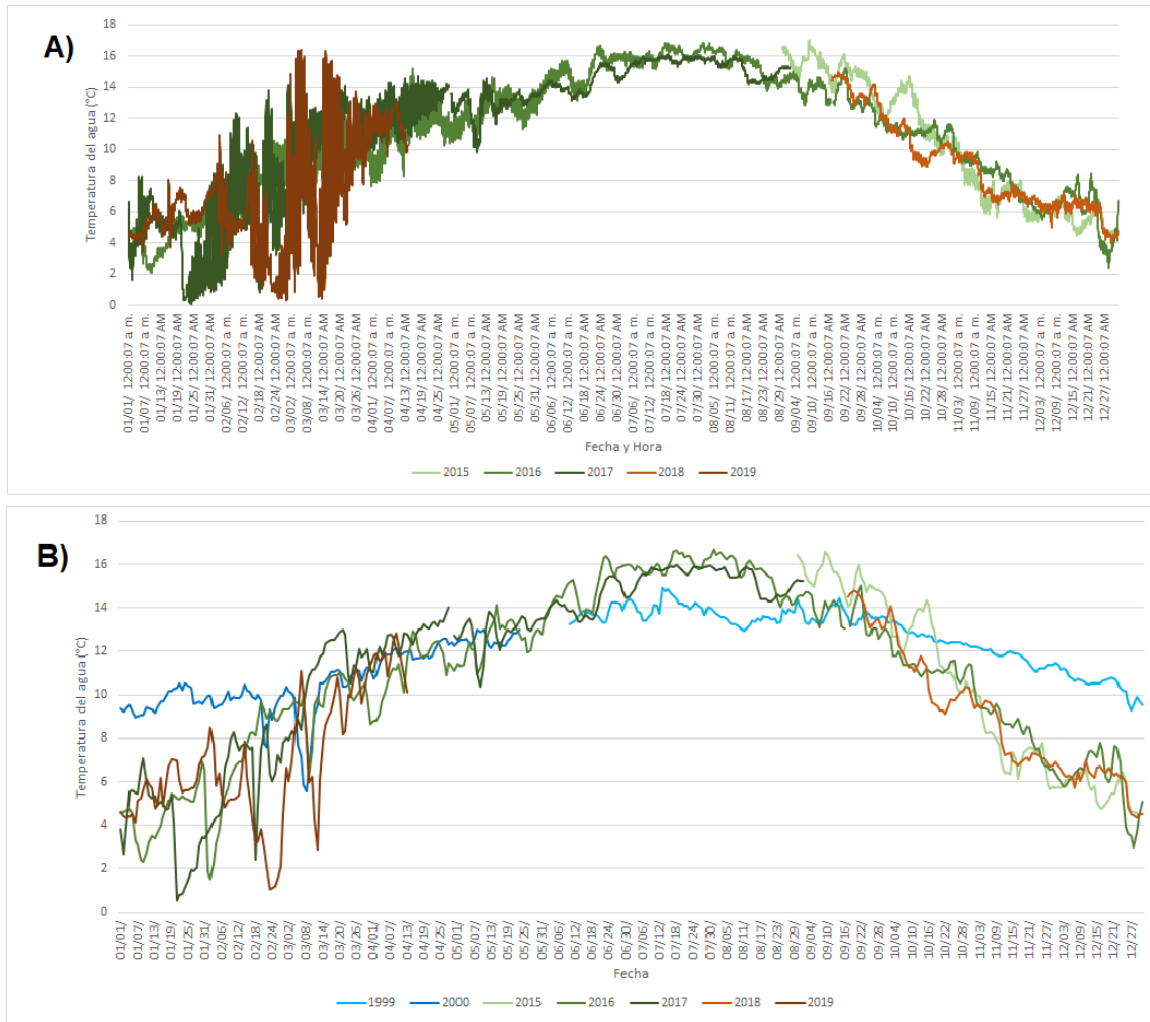


Figura 28. Temperatura del agua registrada con un termógrafo dual en el arroyo La Grulla, SSPM, Baja California (2,080 msnm), (A) Temperatura a intervalos de 1 hora de agosto de 2014 a abril de 2019. (B) Temperatura promedio diaria de junio 1999 a abril 2019.

Arroyo San Rafael

La temperatura del agua se registró a intervalos de 1 h en el sitio San Rafael (1,220 msnm) de febrero de 2014 a febrero de 2015 (Figura 29A), registrándose la temperatura más baja (3.05 °C) el 1 de enero de 2015 y la más alta (27.17 °C) el 8 de junio de 2014. La temperatura promedio durante este periodo fue 14.58 ± 4.9 °C. En este sitio y altitud no se detectaron temperaturas ≥ 28 °C.

La comparación de las temperaturas promedio diarias del agua entre dos periodos (mayo de 1996-mayo de 1997 y febrero de 2014-febrero de 2015) se muestra en la figura 29B. La temperatura promedio diaria más baja en el primer periodo (3.72 °C) correspondió al 7 de enero de 1997 y la más alta (24.04 °C) al 31 de julio de 1996. La temperatura promedio durante este primer periodo fue 14.704 ± 5.69 °C. Además, la temperatura promedio diaria más baja en el segundo periodo (4.01 °C) ocurrió el 2 de enero de 2015 y la más alta (23.17 °C) el 7 de julio de 2014, mientras que la temperatura promedio en este segundo periodo fue 14.58 ± 4.75 °C.

La temperatura promedio calculada durante el verano en el sitio de San Rafael fue significativamente diferente según el año (1996: promedio = 21.35 ± 2.03 °C y 2014: promedio = 20.35 ± 1.67 °C; Prueba t Student, $t = 4.46$, $P < 0.001$).

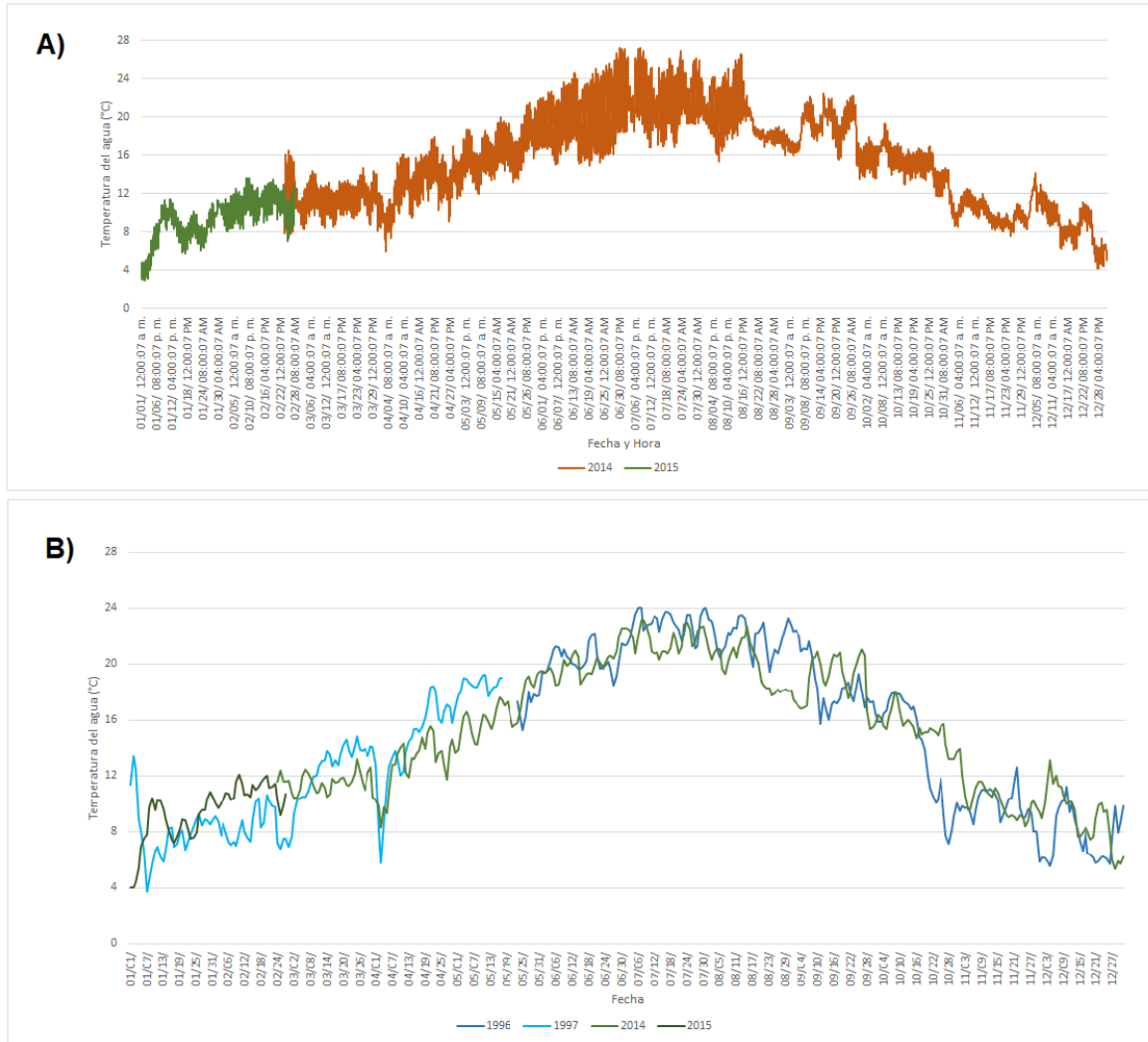


Figura 29. Temperatura del agua registrada con un termógrafo dual en el arroyo San Rafael, sierra San Pedro Mártir, Baja California (1,220 msnm). (A) Temperatura a intervalos de 1 h de febrero 2014 a febrero de 2015. (B) Temperatura promedio diaria de mayo de 1996 a febrero de 2015.

Arroyo San Antonio de Murillos

Los valores de temperatura registrados a intervalos de 1 h en este sitio (553 msnm) desde mayo de 2014 hasta abril de 2015 se muestran en la Figura 30A. El valor más bajo de temperatura (5.19 °C) se registró el 2 de enero de 2015, mientras que el más alto (30.66 °C) se registró el 15 de agosto de 2014. La temperatura promedio durante este periodo fue 19.31 ± 5.73 °C, con una frecuencia alta de días con temperaturas ≥ 28 °C registradas entre el 1 de junio de 2014 y el 26 de septiembre de 2014, dando un tiempo acumulado de 365 h. Este sitio fue el único sitio donde la presencia de truchas coincidió con registros horarios diarios de altas temperaturas (≥ 28 °C), lo que se explica por su baja elevación.

La Figura 30B muestra la temperatura promedio diaria del agua entre mayo de 2014 y abril de 2015, con el valor más bajo (6.91 °C) registrado el 2 de enero de 2015 y el valor más alto (27.09 °C) el 17 de agosto de 2014. La temperatura promedio para todo este periodo fue 19.32 ± 5.41 °C.

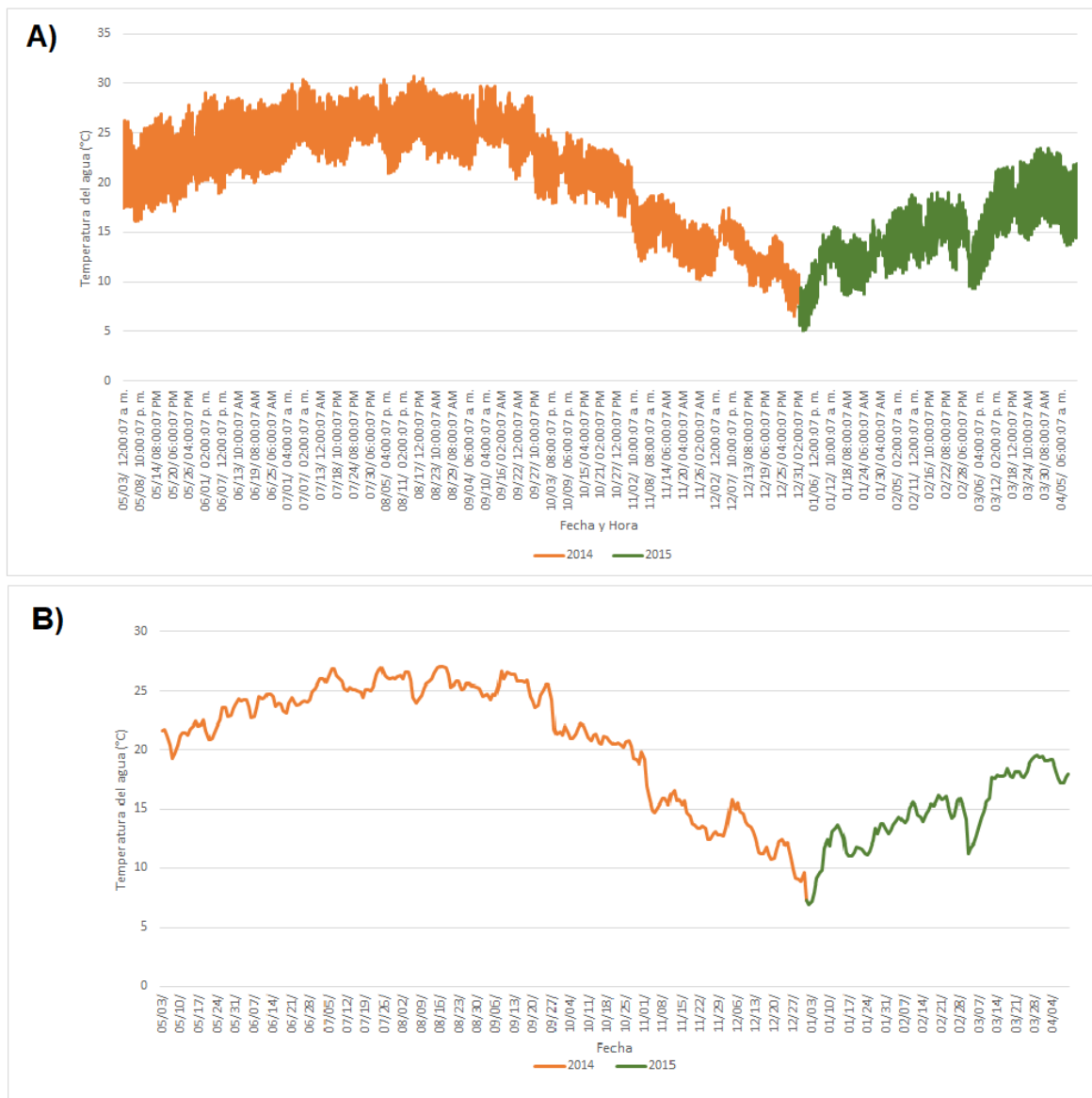


Figura 30. Temperatura del agua registrada con un termógrafo dual en el arroyo San Antonio de Murillos, SSPM, Baja California (553 msnm). (A) Temperatura a intervalos de 1 hora de mayo de 2014 a abril de 2015. (B) Temperatura promedio diaria de mayo de 2014 a abril de 2015.

8.1.2.1 Escenarios de temperatura en los sitios de estudio

Los modelos aplicados se basaron en las temperaturas del agua registradas a intervalos de 1 hora en los tres sitios estudiados entre 2014 y 2016, determinando la amplitud, tiempo (horas) y los espacios con temperaturas ≥ 28 °C, esto último considerado como letal para las truchas arcoíris en el extremo sur de su distribución geográfica.

En el sitio de arroyo La Grulla (2,080 msnm), no se pronosticaron valores de temperatura ≥ 28 °C para los años 2025 y 2050, basados en los tres modelos predictivos de calentamiento global, considerando registros de temperatura a intervalos de 1 hora (Figura 31A).

De igual manera para el sitio de arroyo San Rafael (1,220 msnm), no se pronosticaron valores de temperatura ≥ 28 °C para el año 2025 (Figura 31B); mientras que para el año 2050, los tres modelos predijeron valores por encima de este umbral. El modelo (Mote 2050) que utilizó un aumento de 2 °C predijo el mayor número de eventos extremos, pronosticando un total de 53 horas de temperaturas ≥ 28 °C entre el 29 de junio y el 15 de agosto de 2050. Por su parte, el modelo (HadCM3 2050), usando un aumento de 0.85 °C, predijo el menor número de eventos térmicos extremos (≥ 28 °C) aportando un total de tres horas entre el 30 de junio y el 8 de agosto de 2050 (Tabla 3).

La Figura 32 muestra la temperatura del agua registrada en un ciclo de 24 horas en el sitio de San Rafael para una misma fecha en verano (28 de julio) para los años 1993 y 2014, así como la temperatura pronosticada con el modelo Mote 2050 usando un aumento de 2 °C para esa misma fecha en el año 2050. Una tendencia de aumento en la temperatura del agua es observada, en cualquier horario, para el mismo día del calendario anual, pero en tres años diferentes. En el año 2050, se alcanzarán temperaturas (≥ 28 °C) entre las 15:00 y 17:00 horas que son letales para la supervivencia de la subespecie de trucha arcoíris en cuestión.

Con base en los tres modelos de predicciones para el sitio San Antonio de Murillos, se espera que ocurra un aumento significativo y letal en la temperatura del agua

(≥ 28 °C) en el hábitat de la trucha endémica en los años 2025 y 2050 (Figura 31C). Para el año 2025, el modelo (Mote 2025) (incremento de 0.75 °C) predijo la mayor frecuencia de temperaturas extremas (≥ 28 °C) con un total de 610 h entre el 29 de junio y el 26 de septiembre de 2025; mientras que el modelo (HadCM3 2025) con un incremento de 0.45 °C predijo un menor número de horas (493) con temperaturas letales entre el 31 de mayo y el 26 de junio de 2025 (Tabla 3).

Para el año 2050, en este mismo sitio, el modelo Mote 2050 (aumento de 2 °C) predijo el mayor número de horas acumuladas con temperaturas ≥ 28 °C, dando un total de 1,114 entre el 3 de mayo y el 27 de septiembre de 2050. El HadCM3 2050 El modelo con un aumento de 0,85 °C predijo el menor número de horas por encima de los 28 °C, dando un total de 640 horas acumuladas, del 26 de mayo al 26 de septiembre de 2050 (Tabla 3).

La mayor frecuencia de eventos ≥ 28 °C fue identificado en el Arroyo San Antonio de Murillos, el sitio con mayor incidencia de temperaturas cálidas, principalmente debido a su menor altitud (553 msnm) en comparación con los otros dos sitios de estudio (San Rafael y La Grulla, 1,220 y 2,080 msnm, respectivamente).

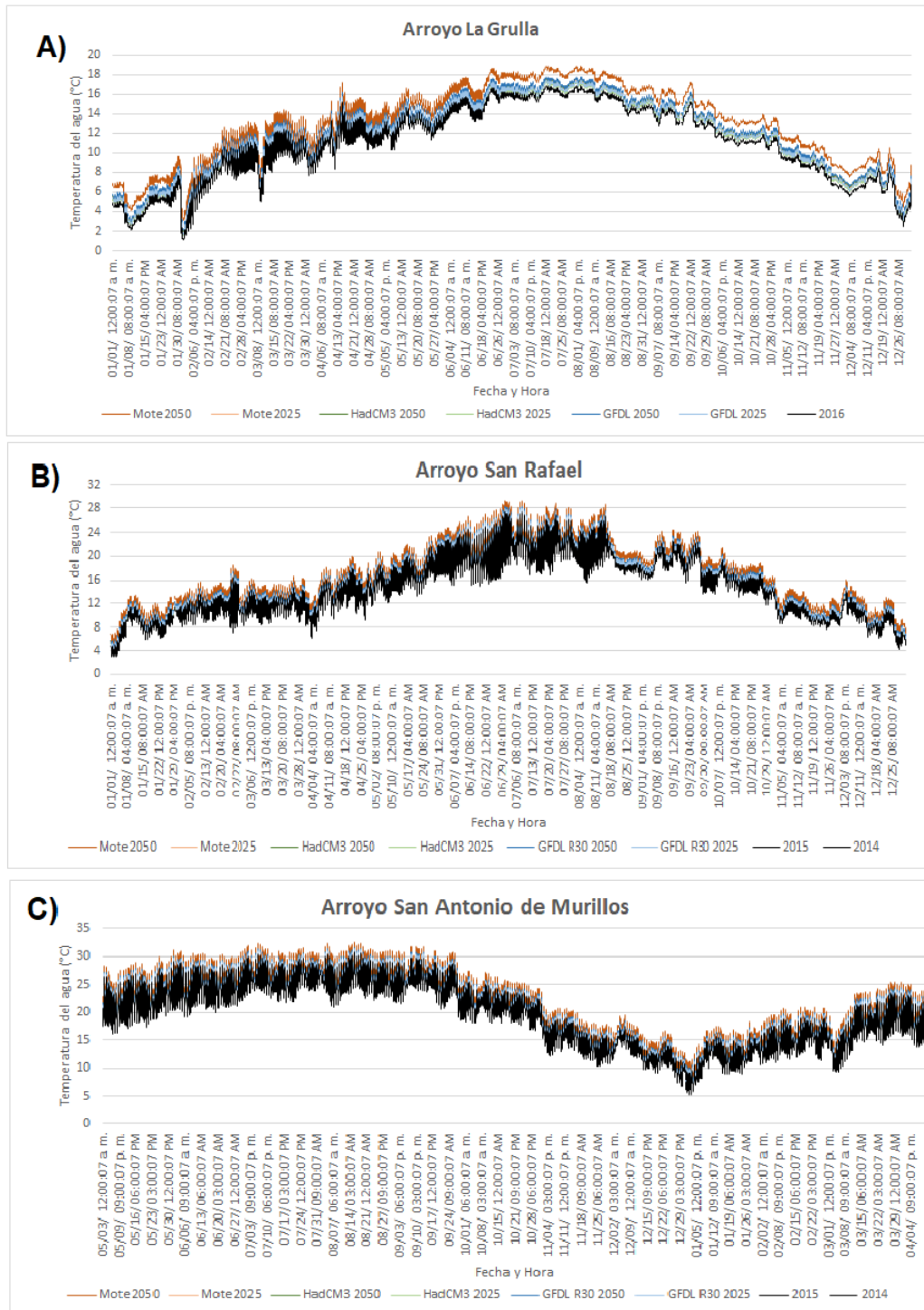


Figura 31. Temperaturas pronosticadas para los años 2025 y 2050 por los modelos climáticos GFDL R30, HadCM3 y Mote, para intervalos de 1 h en los arroyos La Grulla (A), San Rafael (B) y San Antonio de Murillos (C), sierra San Pedro Mártir, Baja California, México.

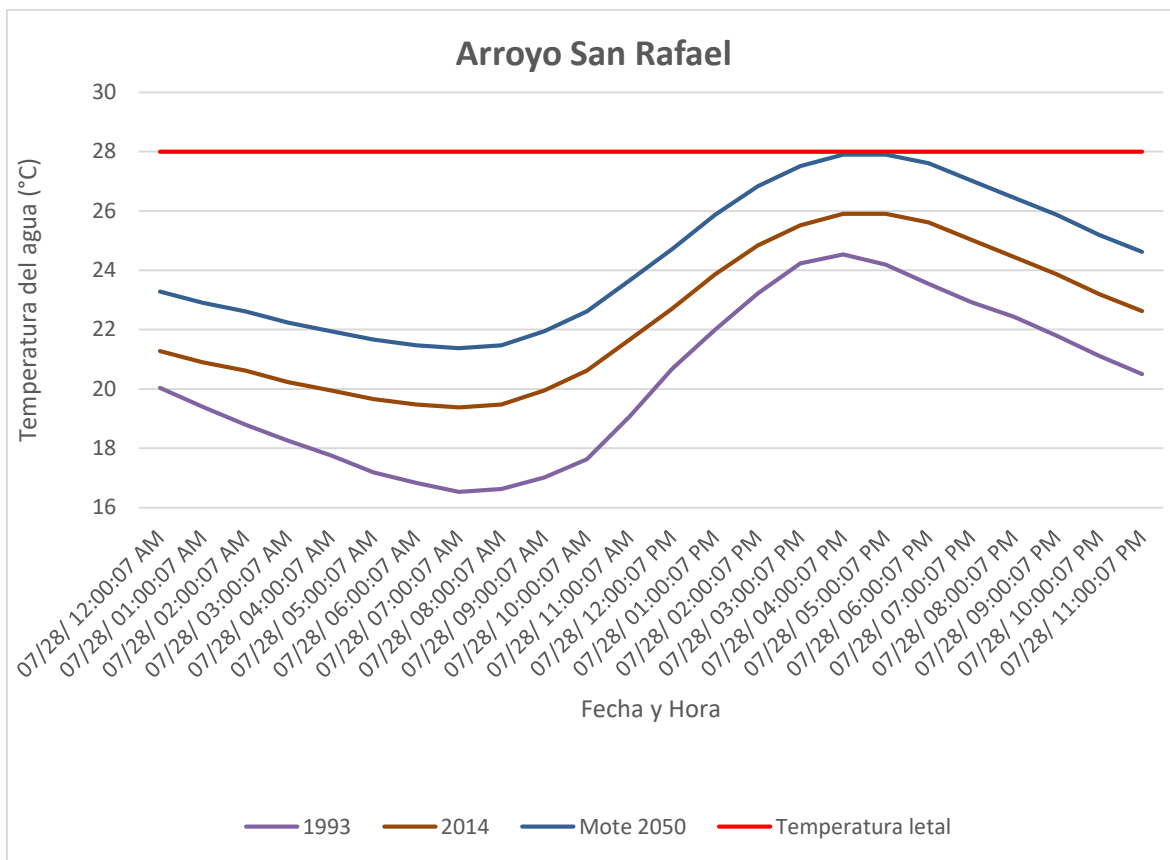


Figura 32. Temperaturas del agua registradas a intervalos de 1 hora para el arroyo San Rafael, sierra San Pedro Mártir, Baja California, durante el día 28 de julio de los años 1993 y 2014, y aquellas pronosticadas con el modelo climático Mote para ese mismo sitio y día del año en 2050.

Tabla 3. Número de horas acumuladas con temperaturas del agua $\geq 28^{\circ}\text{C}$ en tres sitios de la sierra San Pedro Mártir, Baja California, México, basado en proyecciones con tres modelos diferentes para los años 2025 y 2050.

Sitio	Modelo	Año 2025		Año 2050	
		Horas $\geq 28^{\circ}\text{C}$	Periodo	Horas $\geq 28^{\circ}\text{C}$	Periodo
La Grulla	GFDL R30	0	0	0	0
	HadCM3	0	0	0	0
	Mote	0	0	0	0
San Rafael	GFDL R30	0	0	9	30 junio-8 agosto
	HadCM3	0	0	3	30 junio-8 agosto
	Mote	0	0	53	29 junio-15 agosto
San Antonio de Murillos	GFDL R30	548	26 de mayo-26 de septiembre	686	26 mayo-26 junio
	HadCM3	493	31 May-26 June	640	26 mayo-26 septiembre
	Mote	610	29 junio-26 septiembre	1,114	3 mayo-27 septiembre

Altitud mínima con temperaturas ≥ 28 °C para los años 2025 y 2050

La altitud mínima en los arroyos de la SSPM a la cual no se presentarían valores de temperatura promedio diaria y horaria del agua ≥ 28 °C, fue calculada con base en las proyecciones de temperatura descritas anteriormente.

Para el año 2025, se prevé que ocurra una temperatura promedio diaria menor a 28 °C (no letal) a una elevación mínima de 491.04 msnm, según el modelo menos extremo del presente estudio (HadCM3 R30 2025) (+ 0.45 °C), mientras que 511.32 msnm es la altitud mínima a la que se pronostica que se producirán valores de temperatura diaria promedio < 28 °C según el modelo más extremo (Mote 2025) (+ 0,75 °C) (Figura 33A). Para el año 2050, se pronostican temperaturas promedio diarias inferiores a 28 °C a una elevación mínima de 545.12 msnm por el modelo HadCM3 (+ 0,85 °C) y a 700.57 msnm por el modelo Mote 2050 (+ 2 °C) (Figura 33B).

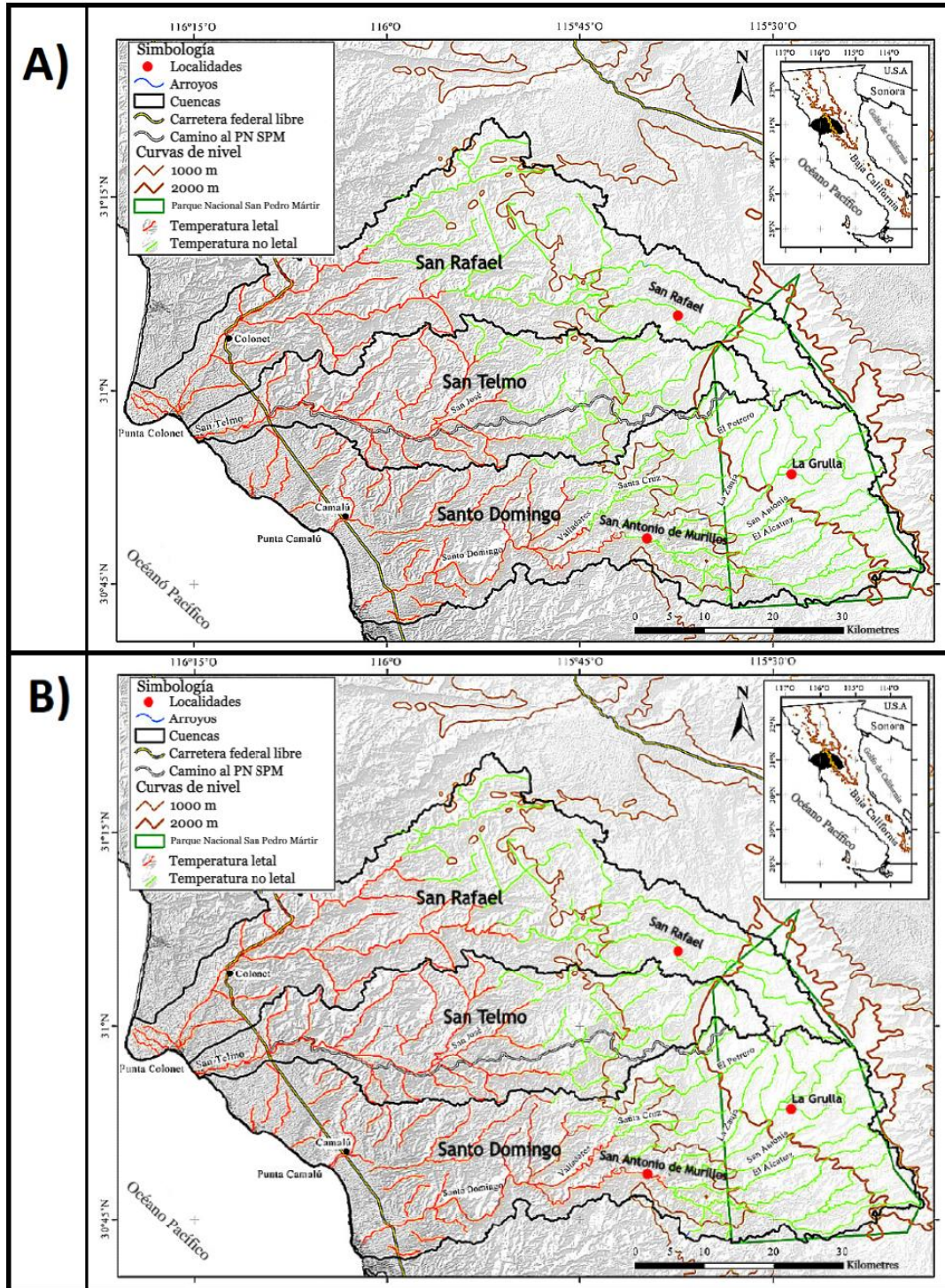


Figura 33. Altitud mínima donde se expresarían valores de temperatura del agua promedio diarias inferiores a 28 °C, en las cuencas de los ríos Santo Domingo, San Telmo y San Rafael, según lo predicho por el modelo Mote para los años 2025 (A) y 2050 (B).

Se pronostican temperaturas por hora inferiores a 28 °C (no letales) para 2025 a una altitud que oscila entre los 868 (según HadCM3 2025) y los 898 msnm (según Mote 2025, el modelo más extremo utilizado en el presente estudio) (Figura 34A). Para el año 2050, se pronostican temperaturas horarias inferiores a 28 °C dentro de un intervalo altitudinal de 908 (HadCM 2050) a 1,028 msnm (Mote 2050) (Figura 34B).

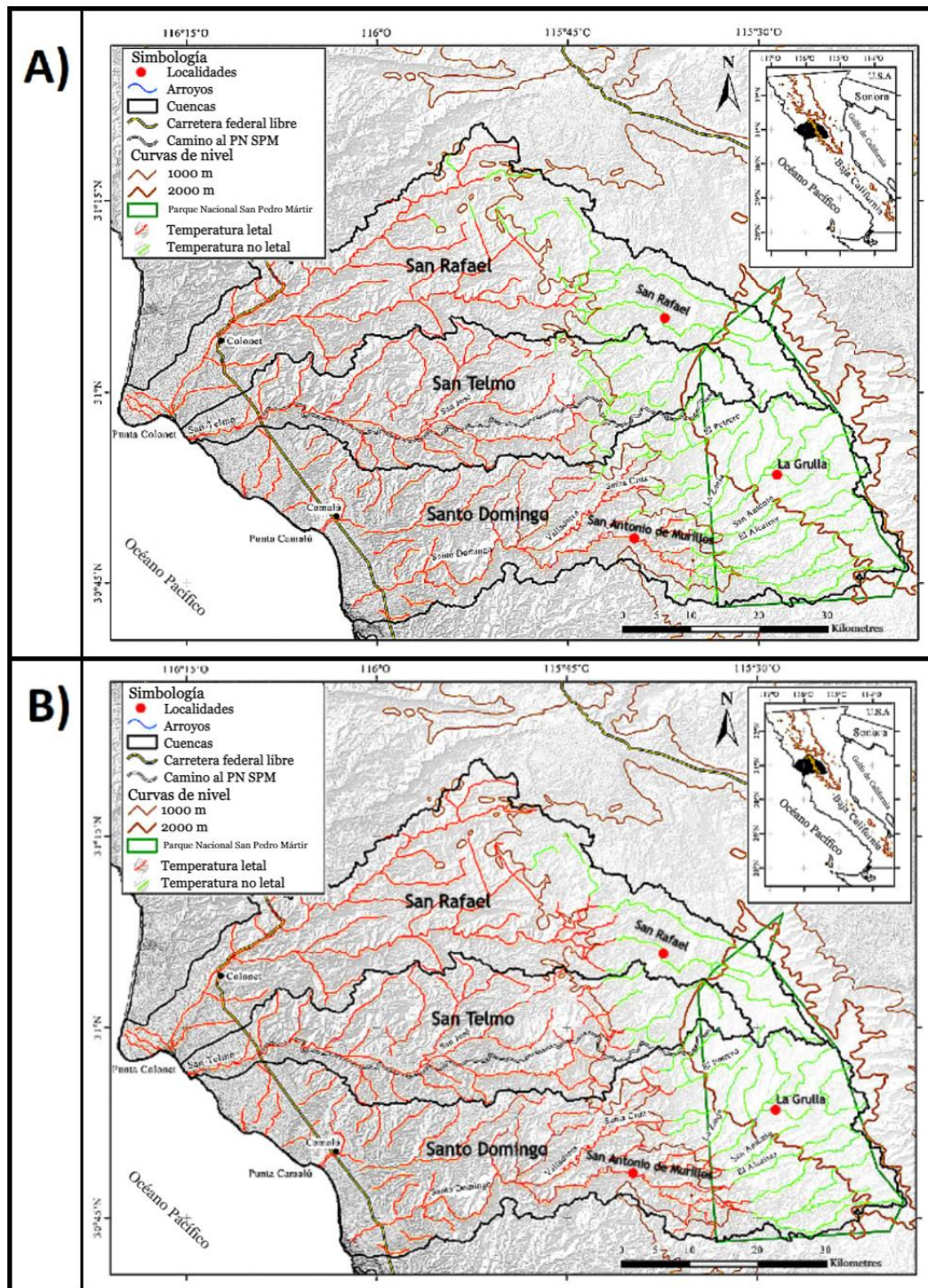


Figura 34. Altitud mínima donde se expresarían valores de temperatura del agua por hora inferiores a 28 °C, en las cuencas de los ríos Santo Domingo, San Telmo y San Rafael, según lo predicho por el modelo Mote para los años 2025 (A) y 2050 (B).

8.1.2 Composición fisicoquímica del agua

8.1.2.1 Parámetros ambientales

Los valores promedio (actuales e históricos) de los parámetros ambientales registrados por el equipo multianalizador Hydrolab Scout 2 (Hydrolab Co., Austin, Texas) (Fig. 35) en las diferentes localidades estudiadas se muestran en la Tabla 4. El valor de temperatura más alto fue de 25.4 °C en la localidad “San Antonio de Murillos” el día 26 de junio de 2019; mientras que la temperatura más baja obtuvo un valor de 14.2 °C, registrada en la localidad “La Grulla” el día 15 de abril de 2019. El potencial de hidrógeno (pH) en la cuenca del río Santo Domingo osciló entre 6.78 (“La Grulla”, abril de 2017) y 8.76 (“San Antonio de Murillos”, abril de 2015). Otros parámetros fisicoquímicos en las localidades estudiadas se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos del agua de los arroyos La Grulla, El Potrero y San Antonio de Murillos, localizados en la cuenca del río Santo Domingo. Los muestreos analizados fueron realizados en el periodo 1989-2019.

Localidad	Fecha d/m/a	Hora	pH	Temperatura (°C)	Oxig. (mg/l)	Conductividad (mS/cm)	S (%)	TDS (g/l)
Arroyo La Grulla	23/03/1990		8.4					
	11/08/1990		7.9					
	30/09/1990		8.1					
	24/10/1992		8					
	26/09/2014	16:32	8.68	17.51	5.45	0.19		0.14
	08/08/2015	09:40	8.7	17.74	4.39	0.19		0.14
	17/09/2016	12:55	8.31	15.74	6.2	0.32		0.21
	30/04/2017		6.78	16.27	7.82	0.4	0.2	0.26
	15/04/2019	12:00		14.2	8.32			
Arroyo El Potrero	11/03/2019		8					
	17/05/1989		8.1					
	26/11/1989		8.1					
	04/05/2019	18:38		18.9	9.35	0.42		0.267
Arroyo San Antonio de Murillos	29/06/1991		8.2					
	18/06/1992		8.3					
	04/05/2014		7.07	25.24	6.42	0.32		0.15
	13/04/2015		8.76	17.3	5.34	0.14		0.13
	26/06/2019		7.2	25.4	6.8	0.4	0.3	0.18

Fuente:

Ruiz-Campos (1993)
Ruiz-Campos (2017)
Ruiz-Campos (datos no publicados)
Esta investigación



Figura 35. Medición de variables fisicoquímicas del agua con un equipo multianalizador Hydrolab Scout 2 (Hydrolab Co., Austin, Texas) en el sitio del arroyo El Potrero, perteneciente a la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, 4 de mayo de 2019.

8.1.2.2 Parámetros químicos de agua

La toma de parámetros químicos en las localidades de estudio (La Grulla, El Potrero, San Antonio, La Zanja y San Antonio de Murillos) fue llevada a cabo durante el periodo abril-junio 2019 (Fig. 36). Estas muestras ayudaron a identificar el tipo de composición de agua en dichos sitios.



Figura 36. Toma de muestras de agua en la localidad “El Potrero” perteneciente a la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 04 de mayo de 2019.

A continuación, en la tabla 5 se ofrecen los resultados de los parámetros fisicoquímicos pertenecientes a cada una de las muestras obtenidas en este estudio.

Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos pertenecientes a los puntos de muestreo de agua en diferentes localidades pertenecientes a la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.

MUESTREO	Fecha	LOCALIDAD	T	O ₂	O ₂	pH	Conductividad	Salinidad	TDS	Volumen
MUESTRA ID			°C	mg/L	%		µS/cm	(%)	(g/l)	ml
PSTP-1	04/05/2019	El Potrero	19.2	9.8	x	7.78	0.42	0.2	0.267	15
PRUN1-1-2	04/05/2019	El Potrero	18.9	11.1	x	7.78	0.42	0.2	0.267	15
PRUN 2-4	04/05/2019	El Potrero	18.7	11.1	x	7.78	0.42	0.2	0.267	15
P-PCC-3	04/05/2019	El Potrero	18.8	11.1	x	7.78	0.42	0.2	0.267	15
1LZ	01/06/2019	La Zanja	23.6	7.1	x	7.01	0.4	0.3	0.2	15
2LZ	01/06/2019	La Zanja	24	7.05	x	7.48	0.42	0.3	0.21	15
1SA	01/06/2019	San Antonio	25.7	6.82	x	7.25	0.23	0.3	0.12	15
2SA	01/06/2019	San Antonio	26.2	6.8	x	7.2	0.4	0.3	0.17	15
T1	15/04/2019	La Grulla	14.55	8.28	x	6.78	0.4	0.2	0.26	15
T3	15/04/2019	La Grulla	13.9	8.36	x	6.78	0.4	0.2	0.26	15
T5	15/04/2019	La Grulla	14.15	8.33	x	6.78	0.4	0.2	0.26	15
1SM	01/06/2019	San Antonio de Murillos	26.9	6.67	x	6.96	0.42	0.4	0.2	15
2SM	01/06/2019	San Antonio de Murillos	26.1	6.69	x	7.19	0.36	0.3	0.18	15

Las concentraciones de aniones y cationes mayoritarios en las muestras de agua pertenecientes a sitios donde se distribuye la trucha endémica en la cuenca del río Santo Domingo (La Grulla, 2,080 msnm; El Potrero, 950 msnm; San Antonio, 580 msnm; La Zanja, 575 msnm; y San Antonio de Murillos, 553 msnm), se presentan en las tablas 6 y 7.

El anión Fluoruro tuvo una menor presencia en la localidad La Grulla, teniendo un valor de 0.1 mg/l, mientras que en las demás localidades la concentración fue de 0.2 mg/l. La concentración de cloruro fue menor en la localidad La Grulla, con 5.7 mg/l en la muestra T1, y el valor más alto (40 mg/l) se obtuvo en la localidad El Potrero, perteneciente a la muestra PRUN1-1-2. El Nitrito fue encontrado en cantidades <0.1 mg/l en casi todas las muestras de agua, a excepción de las muestras T3 y PRUN1-1-2 pertenecientes a las localidades La Grulla y El Potrero respectivamente. El Bromuro fue encontrado con valores 0.1 o <0.1 en todas las muestras analizadas. El Nitrato se encontró en menor concentración en la muestra T1, perteneciente a la localidad La Grulla, el valor más alto (28 mg/l) en la muestra 1SM, de la localidad San Antonio de Murillos. La menor concentración de Sulfato se localizó en la localidad La Grulla con un valor de 2.3 mg/l en la muestra T5, mientras que la mayor (30 mg/l) en la muestra 1LZ de la localidad La Zanja. Por último, la concentración de Fosfato fue <0.2 mg/l en todas las muestras que se analizaron (Tabla 6).

Tabla 6. Concentración de aniones mayoritarios en muestras de agua obtenidas de los arroyos La Grulla, El Potrero, San Antonio, La Zanja y San Antonio de Murillos, en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir.

Muestra	Localización	Altitud (msnm)	Fecha de muestreo	Fluoruro	Cloruro	Nitrito	Bromuro	Nitrato	Sulfato	Fosfato
				mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
T1	La Grulla	2080	15/04/2019	0.1	5.7	0.1	<0.1	0.2	2.7	<0.1
T3	La Grulla	2060	15/04/2019	0.1	6.3	0.3	<0.1	4.3	2.9	<0.1
T5	La Grulla	2049	15/04/2019	0.1	6.3	<0.1	<0.1	1.6	2.3	0.2
PSTP-1	El Potrero	950	04/05/2019	0.2	34	<0.1	0.1	4.6	11	0.1
PRUN1-1-2	EL Potrero	945	04/05/2019	0.2	40	0.5	0.1	0.7	12	0.2
PRUN 2-4	El Potrero	942	04/05/2019	0.2	39	<0.1	0.1	6.1	12	0.2
P-PCC-3	El Potrero	940	04/05/2019	0.2	37	<0.1	0.1	1.3	12	<0.1
1SA	San Antonio	575	26/06/2019	0.2	19	<0.1	<0.1	0.4	9.2	<0.1
2SA	San Antonio	585	26/06/2019	0.2	29	<0.1	0.1	9.8	12	<0.1
1LZ	La Zanja	570	26/06/2019	0.2	34	<0.1	0.1	14	30	<0.1
2LZ	La Zanja	580	26/06/2019	0.2	25	<0.1	<0.1	25	28	<0.1
1SM	San Antonio de Murillos	562	26/06/2019	0.2	28	<0.1	<0.1	28	11	<0.1
2SM	San Antonio de Murillos	565	26/06/2019	0.2	25	<0.1	0.1	2.7	12	<0.1

En la tabla 7 se muestran las concentraciones obtenidas de los principales cationes de cada una de las muestras de agua y sedimento obtenidas en cinco sitios donde se distribuye esta trucha dentro de la cuenca del río Santo Domingo (La Grulla, El Potrero, San Antonio, La Zanja y San Antonio de Murillos. En total fueron 33 aniones los analizados en laboratorio, sin embargo, se decidió analizar la información resultante de los cationes Sodio (Na), Magnesio (Mg), Potasio (K) y Calcio (Ca), debido que estos cationes junto con los aniones Cl, SO₄ y HCO₃ (éste último por diferencia no fue utilizado), forman el 99% de las sales disueltas. El valor de Sodio (Na) más bajo fue encontrado en la muestra T3 perteneciente a la localidad La Grulla con un valor de 25 mg/l, mientras que el más alto (35 mg/l) fue encontrado en la muestra PRUN 1-1-2 de la localidad El Potrero. En lo que respecta al Magnesio (Mg), el valor más bajo se localizó en el sitio La Grulla, cuya muestra T3 tuvo una cantidad de 2.4 mg/l, el valor más alto fue de 8.6 mg/l en la localidad El Potrero, perteneciente a la muestra PRUN 1-1-2. El Potasio (K) se presentó en menor cantidad en la localidad La Grulla, con un valor de 1.3 mg/l en la muestra T3, mientras que el valor más alto de Potasio (4 mg/l) se dio en la muestra 1 LZ, perteneciente a la localidad La Zanja. Por último, el catión Calcio (Ca) fue encontrado en menor cantidad en la localidad El Potrero, con un valor de 29 mg/l en la muestra PSTP-1, el valor más alto se obtuvo en la localidad El Potrero con un valor de 49.8 mg/l perteneciente a la muestra PRUN 2-4.

Tabla 7. Principales cationes (Na, Mg, K y Ca) pertenecientes a las muestras de agua obtenidas de los arroyos La Grulla, El Potrero, San Antonio, La Zanja y San Antonio de Murillos, localizados en la cuenca del río Santo Domingo. Los muestreos fueron realizados en el año 2019.

Muestra	Localidad	Altitud (msnm)	Fecha de muestreo	Na	Mg	K	Ca
				Valor	Valor	Valor	Valor
				mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
T1	La Grulla	2080	15/04/2019	28.0	2.7	1.5	34.7
T3	La Grulla	2060	15/04/2019	25.0	2.4	1.3	30.9
T5	La Grulla	2049	15/04/2019	28.4	2.9	1.7	34.2
PSTP-1	El Potrero	950	04/05/2019	27.7	6.9	3.1	29.0
PRUN 1-1-2	El Potrero	945	04/05/2019	34.8	8.6	3.6	37.8
PRUN 2-4	El Potrero	942	04/05/2019	34.1	8.5	3.6	49.8
P-PCC-3	El Potrero	940	04/05/2019	34.0	8.3	3.8	40.0
1 SA	San Antonio de Murillos	575	26/06/2019	30.8	5.4	2.8	42.6
2 SA	San Antonio de Murillos	585	26/06/2019	28.6	4.9	2.7	36.4
1 LZ	La Zanja	570	26/06/2019	31.7	7.5	4.0	44.7
2 LZ	La Zanja	580	26/06/2019	33.2	7.9	3.9	44.8
1 SM	San Antonio de Murillos	562	26/06/2019	31.9	5.7	3.0	49.5
2 SM	San Antonio de Murillos	565	26/06/2019	27.6	4.8	2.6	36.6

De acuerdo a los valores permisibles por la NOM-127-SSA1-1994 para los principales cationes y aniones analizados en esta investigación, solo el nitrato presentó valores por arriba del límite establecido (1LZ, 14 mg/l; 2LZ, 25 mg/l; y 1SM, 28 mg/l) (Tabla 8).

Tabla 8. Valores permisibles por la NOM-127-SSA1-1994 y aquellos obtenidos en esta investigación para los principales cationes y aniones pertenecientes a las muestras de agua obtenidas de los arroyos La Grulla, El Potrero, San Antonio, La Zanja y San Antonio de Murillos, localizados en la cuenca del río Santo Domingo. Los muestreos fueron realizados en el año 2019.

Característica (mg/l)	NOM-127 (1994) Limite permisible	Valores obtenidos en esta investigación			
		Promedio	Min	Max	Desviación estándar
Fluoruro	1.5	0.18	0.10	0.20	0.04
Cloruro	250	25.25	5.70	40.00	12.45
Nitrito	0.5	0.30	0.10	0.5	0.20
Nitrato	10	7.59	0.20	28	9.31
Sulfato	400	12.08	2.30	30	8.43
Na	50-200	30.45	25.00	34.8	3.10
Mg	50-150	5.88	2.40	8.6	2.26
K	12	2.89	1.30	4	0.92
Ca	75-200	39.31	29	49.8	6.63

Los diagramas de Stiff para cada localidad muestran que todas las aguas tienen una composición química similar, es decir, de tipo carbonatado cálcico y que los aumentos en la conductividad eléctrica dependen principalmente del aumento en las concentraciones de Calcio y Bicarbonato (Fig. 37).

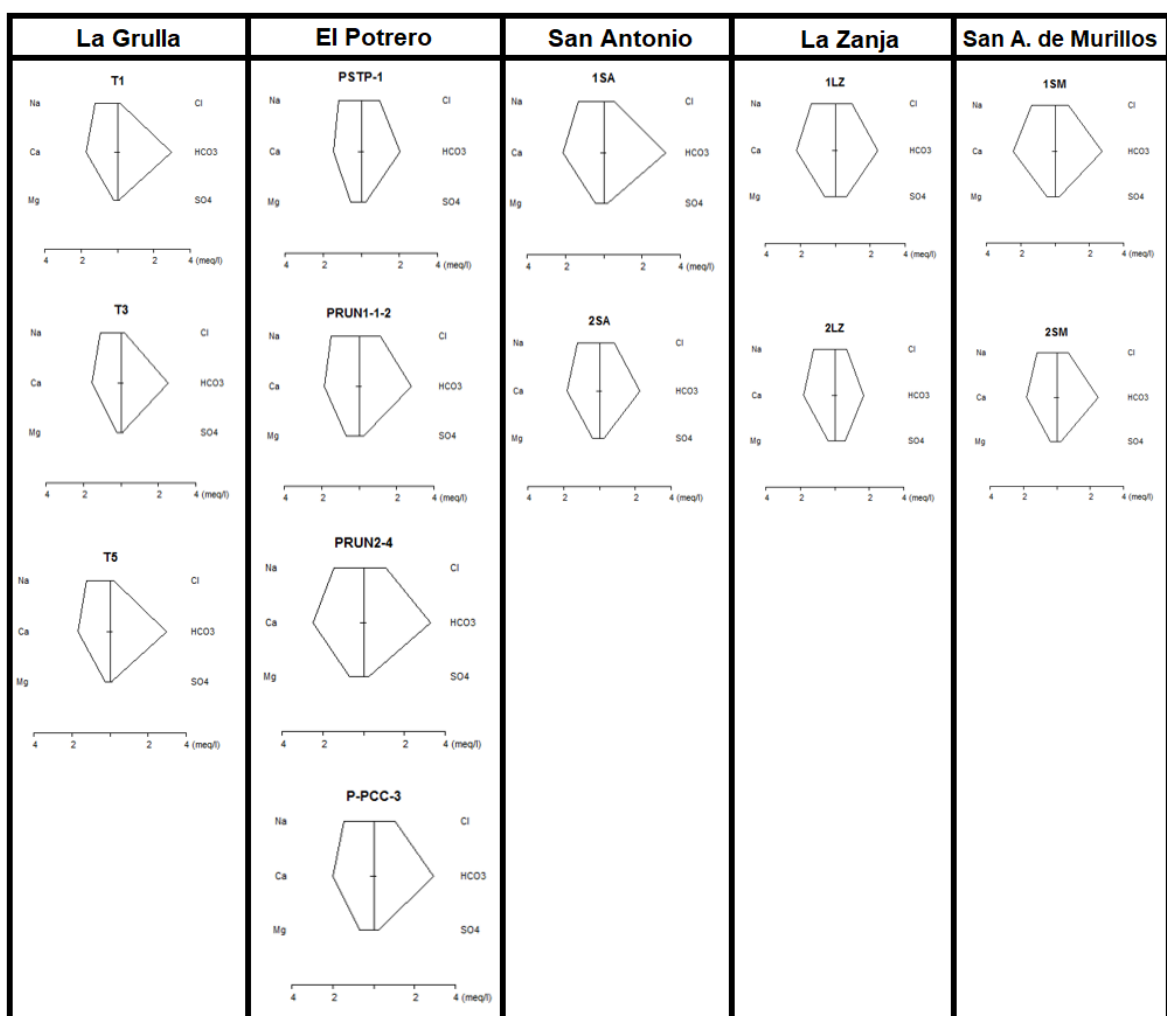


Figura 37. Diagramas de Stiff de las localidades de estudio para cada una de las muestras de agua durante el periodo abril-junio 2019, localizadas en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.

Como resultado del análisis de isótopos estables en el presente estudio, en la figura 38 se muestra que las aguas superficiales de las localidades de estudio variaron entre -8.94 a -7.44‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y de -68.1 a -58.1‰ para $\delta^2\text{H}$. El agua superficial en La Grulla (2,080 msnm) tuvo un $\delta^{18}\text{O}$ entre -9.48 y -8.94 ‰ y un $\delta^2\text{H}$ entre -68.1 y -66.1‰. En la localidad El Potrero (950 msnm) el agua superficial obtuvo un $\delta^{18}\text{O}$ entre -8.96 y -8.80 ‰ y un $\delta^2\text{H}$ entre -62.2 y -61.5‰. El agua en la localidad San Antonio (585 msnm) mostró un $\delta^{18}\text{O}$ entre -7.95 y -7.44 ‰ y un $\delta^2\text{H}$ entre -59.9 y -58.1‰. En la localidad La Zanja (580 msnm) el $\delta^{18}\text{O}$ estuvo entre -8.71 y -8.71 ‰ y un $\delta^2\text{H}$ entre -61.7 y -61.0‰. Por último, en la localidad San Antonio de Murillos (localidad tipo, 565 msnm) el $\delta^{18}\text{O}$ osciló entre -7.88 y -7.83 ‰ y un $\delta^2\text{H}$ entre -59.8 y -59.4‰. En dicha figura se observan tres grupos de agua, esta distinción en su composición es debido a la diferencia de altitud en las localidades (La Grulla, 2,080 msnm; El Potrero, 950 msnm; San Antonio, 585 msnm; La Zanja, 580 msnm; y San Antonio de Murillos (localidad tipo), 565 msnm), tal como lo menciona Lima (2019). la altitud provoca que la composición de isótopos estables de oxígeno e hidrógeno en el agua lluvia disminuya con la altura.

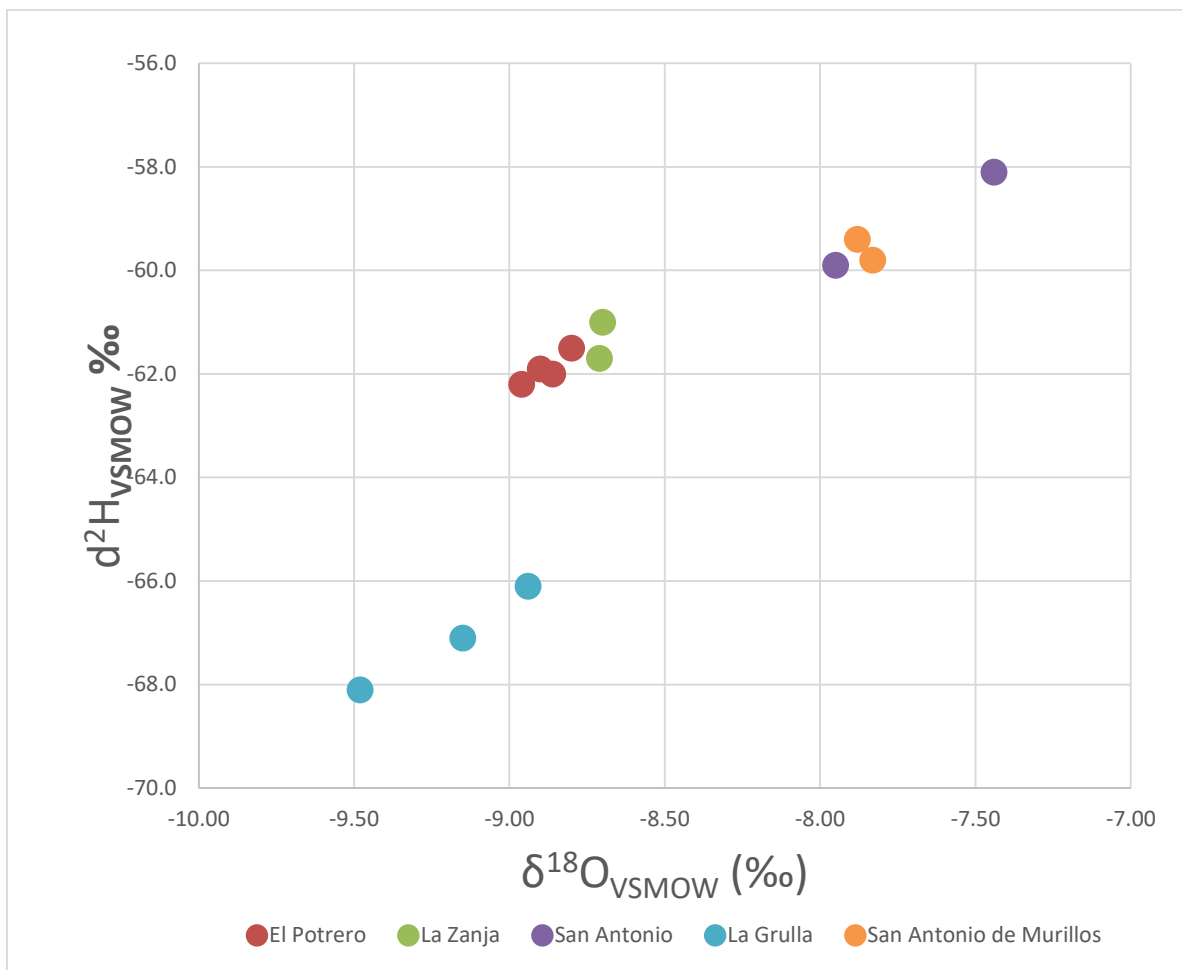


Figura 38. Composición isotópica de oxígeno e hidrógeno en H₂O pertenecientes a las localidades de estudio ubicadas en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.

Por otro lado, de acuerdo al diagrama de Piper construido para este estudio, las composiciones hidrogeoquímicas dominantes (Fig. 39) en la localidad con mayor altitud (La Grulla, 2,080 msnm) son de tipo Ca-Na-HCO₃. En la localidad “El Potrero” se encontró una composición de tipo Ca-Na-HCO₃-Cl. En las localidades con menor altitud (San Antonio, 585 msnm; La Zanja, 580 msnm; y San Antonio de Murillos, 553 msnm) se identificaron composiciones de tipo Ca-Na-HCO₃-Cl y Ca-Na-HCO₃.

Tipos de aguas

- 1 Sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnéticas
- 2 Bicarbonatadas cálcicas y/o magnéticas
- 3 Cloruradas y/o sulfatadas sódicas
- 4 Bicarbonatadas sódicas
- 5 Magnéticas
- 6 Cálcicas
- 7 Sódicas
- 8 Magnéticas, cálcicas y sólidas
- 9 Sulfatadas
- 10 Bicarbonatadas
- 11 Cloruradas
- 12 Sulfatadas, bicarbonatadas y cloruradas

Localidades

- La Grulla
- El Potrero
- San Antonio
- La Zanja
- San Antonio de Murillos

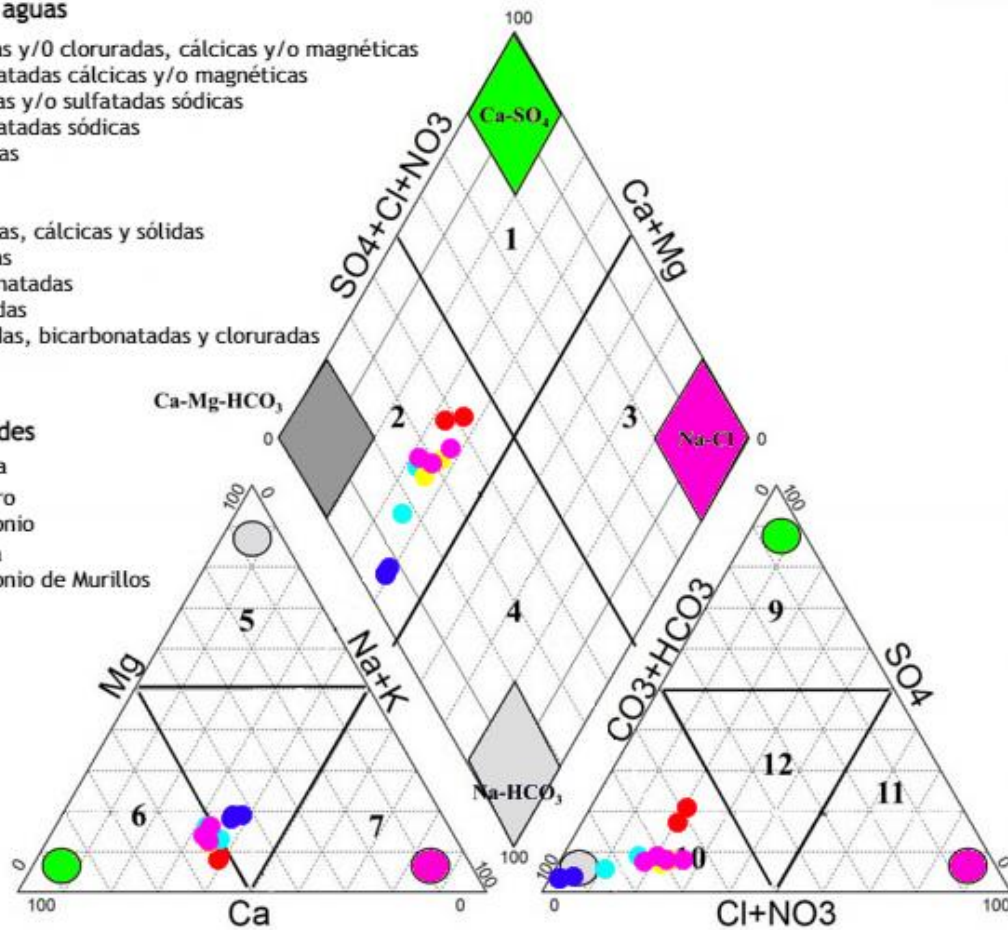


Figura 39. Diagrama de Piper de las aguas colectadas durante el periodo abril-junio 2019, en La Grulla, El Potrero, San Antonio, La Zanja y San Antonio de Murillos, localizadas en la cuenca del río Santo Domingo.

8.1.3 Variación del caudal en la cuenca del río Santo Domingo

La variación del caudal en los arroyos de distribución de la trucha en la cuenca del río Santo Domingo, fue analizada mediante la comparación de los valores registrados durante muestreos recientes (2014-2019) y aquellos históricos en cada una de los sitios de estudio (Tabla 9).

Tabla 9. Características fisiográficas e hidrométricas históricas y recientes de los arroyos de distribución de la trucha *O. m. nelsoni*, en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California. Clasificar cuales son recientes y cuales son históricas (las recientes deben ser aquellas de 2014 a 2019) y las históricas aquellas de 1905 a 1992.

Arroyo	Estación Lluvias/Secas	Fecha (día/mes/año)	Anchura (m)	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)	Descarga m³/s
La Grulla	Lluvias	23/03/1990	2.08	0.31	0.17	0.1
	Secas	11/08/1990	5.78	0.3	0.13	0.2
		30/09/1990	3.58	0.17	0.13	0.07
		Promedio	4.68	0.24	0.13	0.14
	Lluvias	24/10/1992	8.9	0.24	0.06	0.1
	Secas	26/09/2014	4.43	0.2	0.23	0.07
		08/08/2015	6.76	0.4	0.01	0.02
		Promedio	5.6	0.3	0.12	0.05
	Secas	17/09/2016	8.62	0.18	0.038	0.07
	Lluvias	30/04/2017	6.59	0.15	0.12	0.06
	Secas	16/09/2018	8.62	0.18	0.048	0.08
	Lluvias	18/11/2018	8.62	0.18	0.05	0.09
	Secas	15/04/2019	8.62	0.21	0.06	0.11
El Potrero	Secas	11/03/1989	4.11	0.12	0.32	0.14
		17/06/1989	1.88	0.23	0.16	0.06
		26/09/1989	3.76	0.07	0.21	0.05
		Promedio	3.25	0.14	0.23	0.08
	Secas	04/05/2019	2.67	0.15	0.26	0.08
San Antonio de Murillos	Secas	30/07/1905	3	0.254	2.68	1.63
	Secas	17/05/1936	4.05	x	x	0.113
	Secas	23/05/1937	x	x	x	0.17
	Secas	29/06/1991	5.82	0.08	0.38	0.16
	Secas	17/06/1992	4.86	0.12	0.34	0.17
	Secas	04/05/2014	6.46	0.28	0.15	0.22
	Secas	13/04/2015	4.5	0.2	0.25	0.18
	Secas	26/06/2019	4.09	0.33	0.12	0.09

Fuente:

Needham (1938)

Needham (1955)

Ruiz-Campos (2017)

Esta investigación

G. Ruiz-Campos (datos no publicados)

De acuerdo a la tabla 9 la información se puede resumir de la siguiente forma:

La Grulla (30°53'31.23"N, 115°28'55.82"O, altitud 2,080 msnm). Este análisis se dividió en dos categorías, la Estación Lluvias, en los meses de octubre a marzo, y la Estación Secas, en los meses de abril a septiembre. Cabe señalar que el caudal en un arroyo fluctúa dependiendo de la estación climática ya sea lluviosa o no lluviosa, por ello, deben compararse periodos de la misma estación para poder obtener un análisis confiable.

Cinco periodos en la estación Secas (abril-septiembre) fueron analizados, el primer periodo (agosto 1990-septiembre 1990), segundo periodo (septiembre 2014-agosto 2015), tercer periodo (septiembre 2016), cuarto periodo (septiembre 2018) y quinto periodo (abril 2019). Se observa una disminución del primer periodo al segundo periodo, 0.14 m³/s (agosto 1990-septiembre 1990) y 0.05 m³/s (septiembre 2014-agosto 2015). Posteriormente se encontró un ligero aumento del caudal con el transcurso de los años, tercer periodo (0.07 m³/s, septiembre 2016), cuarto periodo (0.08 m³/s, septiembre 2018) y quinto y último periodo analizado en esta categoría (0.11 m³/s, abril 2019) (Fig. 40).

Cuatro periodos en la estación Lluvias (octubre-marzo) fueron analizados, primer periodo (marzo 1990), segundo periodo (octubre 1992), tercer periodo (abril 2017) y cuarto periodo (noviembre 2018). Durante el primero y segundo periodo los valores del caudal fueron iguales, teniendo un valor de 0.1 m³/s, posteriormente en el tercer periodo analizado (abril 2017) se observó una notable disminución del 40% dando como resultado 0.06 m³/s. Por último, en el cuarto periodo hubo un aumento del caudal, dando un valor de 0.09 m³/s (Fig. 40).

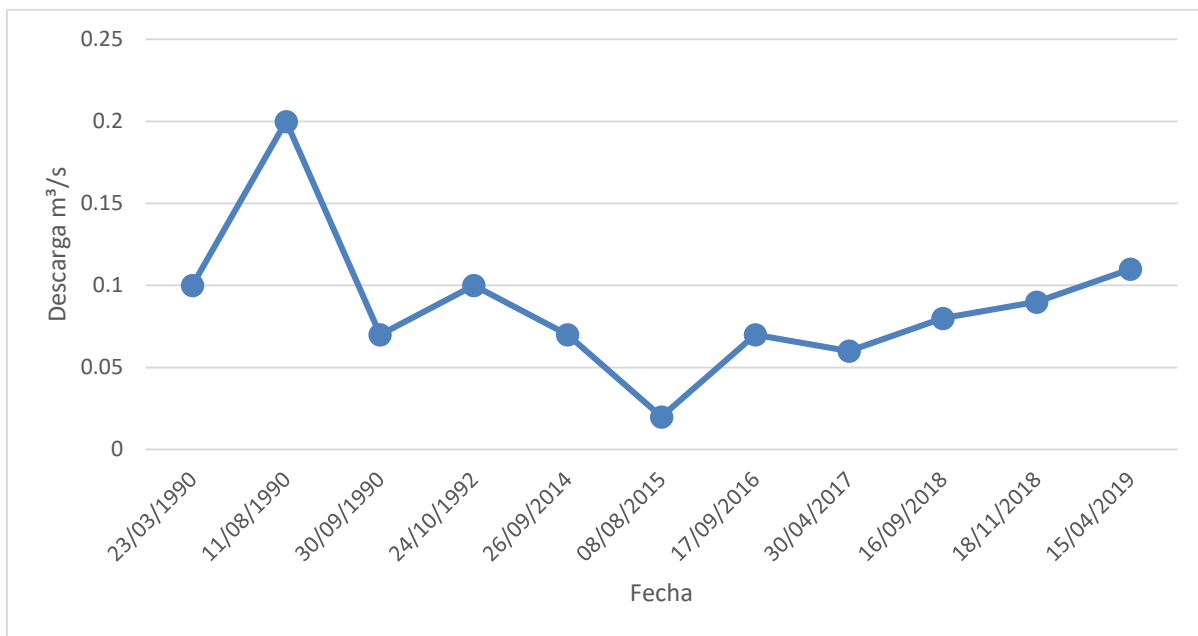


Figura 40. Valores históricos y actuales de descarga del arroyo “La Grulla” perteneciente a la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.

El Potrero (30°54'59.80"N, 115°38'44.40"O, altitud 950 msnm). En esta localidad solo se obtuvo un periodo por categoría, la estación Secas comprendió de marzo 1999 a septiembre 1999, teniendo un caudal promedio de 0.08 m³/s. La categoría de estación Lluvias analizado en esta localidad comprendió en la medición de (noviembre 2019), dando un valor de 0.08 m³/s. Cabe mencionar nuevamente que diferentes estaciones (Lluvias y Secas) no pueden ser comparadas, por lo cual, se recomienda continuar con las mediciones del caudal en las dos diferentes estaciones, con el fin de poder determinar la variabilidad que hay en el caudal de este arroyo (Fig. 41).

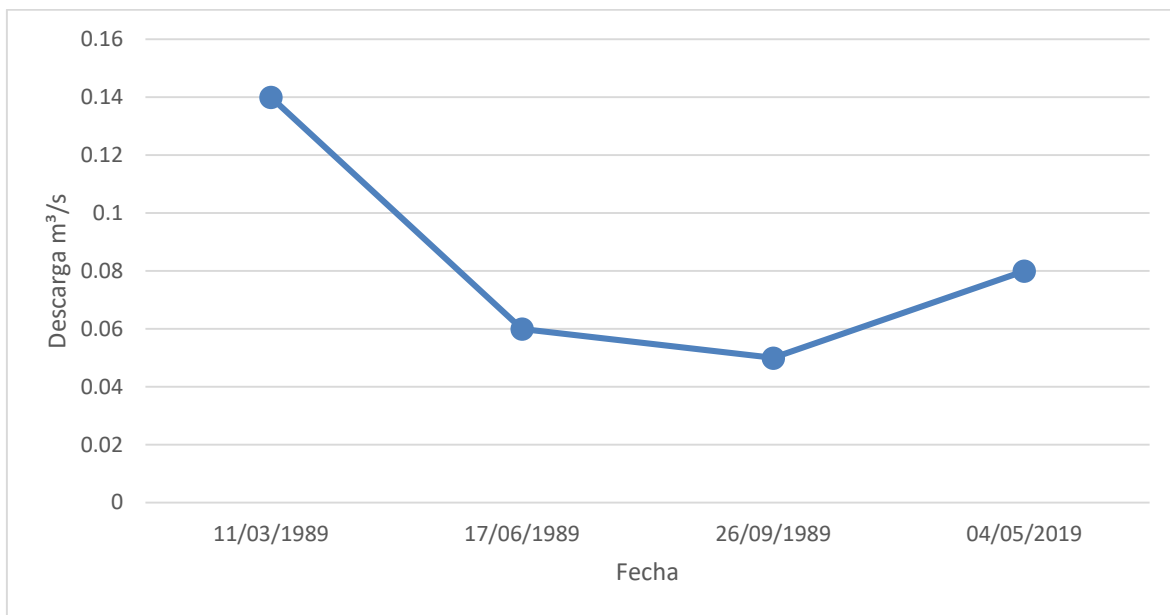


Figura 41. Valores históricos y actuales de descarga del arroyo “El Potrero” perteneciente a la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.

San Antonio de Murillos (localidad tipo) ($30^{\circ}49'5.12''\text{N}$, $115^{\circ}37'50.24''\text{O}$, altitud 553 msnm). En este sitio solo se obtuvieron mediciones de la estación Secas, comprendiendo en total ocho periodos de tiempo. Primer periodo (julio 1905), segundo periodo (mayo 1936), tercer periodo (mayo 1937), cuarto periodo (junio 1991), quinto periodo (junio 1992), sexto periodo (mayo 2014), séptimo periodo (abril 2015) y octavo periodo (junio 2019). Del primer periodo ($1.63 \text{ m}^3/\text{s}$, julio 1905) a los demás periodos analizados se observa una notable disminución ($0.113 \text{ m}^3/\text{s}$, mayo 1936; $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$, mayo 1937; $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$, junio 1991; hasta el último periodo evaluado ($0.09 \text{ m}^3/\text{s}$, junio 2019) (Fig. 42).

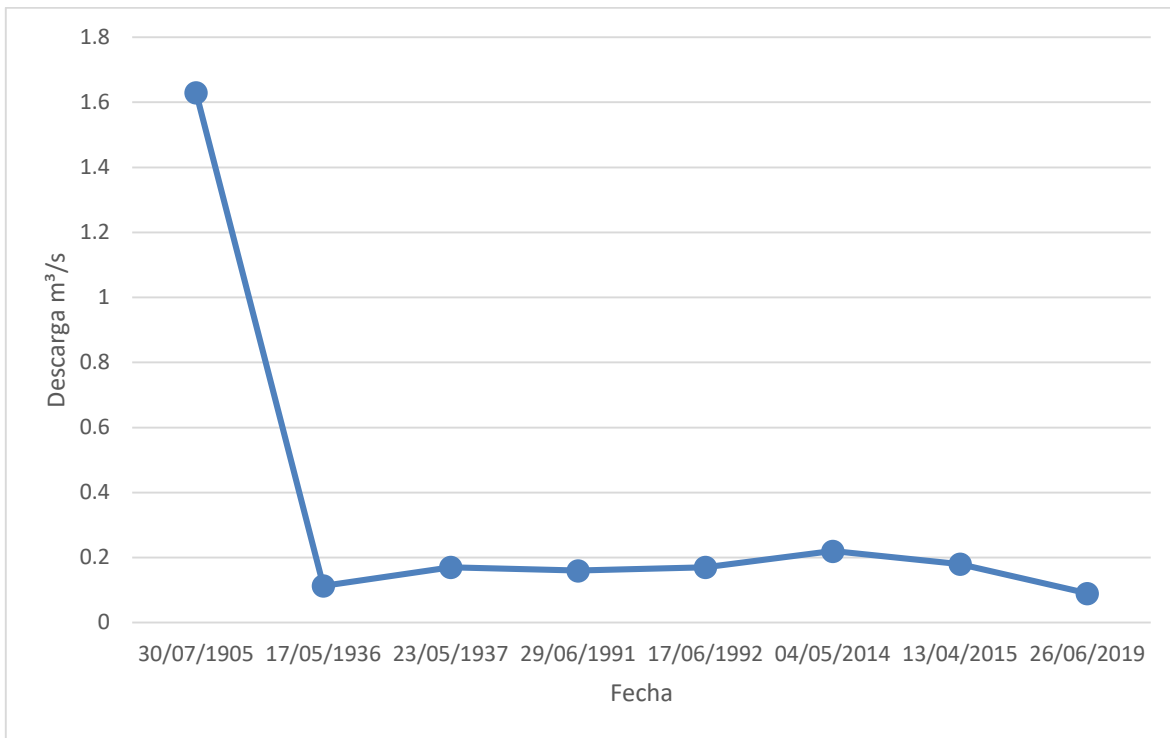


Figura 42. Valores históricos y actuales de descarga del arroyo “San Antonio de Murillos” perteneciente a la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.

La reducción en los niveles de flujo e inundación del arroyo en uno de los sitios de estudio (La Grulla) fue documentada con base en registros fotográficos en los últimos 28 años (Ruiz-Campos, 1993, Ruiz-Campos y Pister, 1995; Ruiz-Campos et. al., 2014a; Ruiz-Campos, 2017). El análisis cronológico comparativo se ilustra en la figura 43, donde claramente se aprecia una disminución progresiva en los niveles de flujo e inundación en el período agosto 1990 (Descarga = 0.2 m³/s) a noviembre de 2018 (Descarga = 0.09 m³/s).

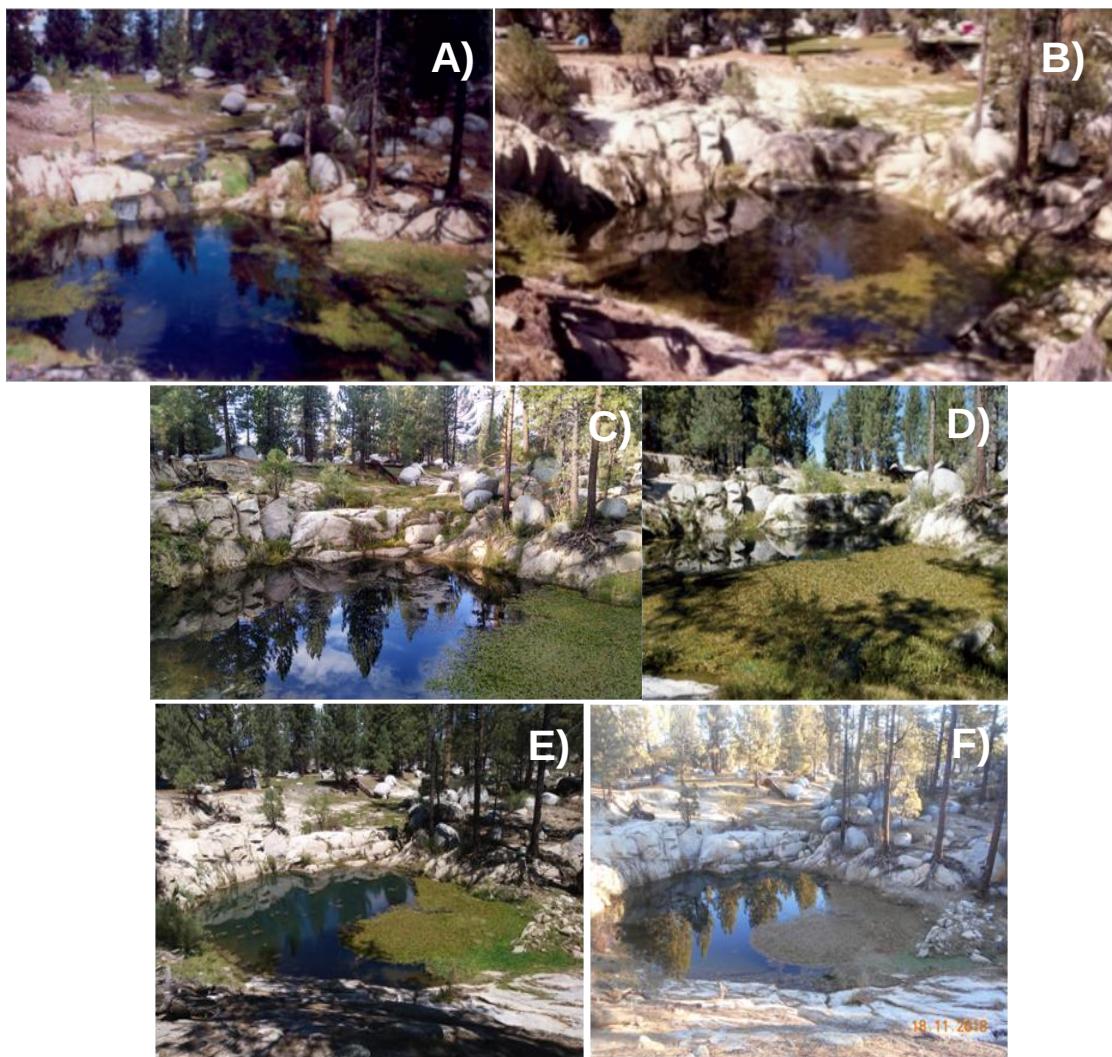


Figura 43. Imágenes tomadas en la localidad de La Grulla en diferentes años en un lapso de 28 años: A) agosto de 1990. B) septiembre de 2014, C) agosto de 2015, D) septiembre de 2016, E) septiembre de 2018, y F) noviembre de 2018. Fotografías por Gorgonio Ruiz-Campos.

8.1.4 Distribución y abundancia histórica y actual de la trucha *O. m. nelsoni*

En este rubro se analizó la abundancia de esta trucha obtenida en muestreos recientes (2019) en localidades de la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, y se comparó con aquella de muestreos previos en el período (1995-2019) registrada por Ruiz-Campos (2017) en esos mismos sitios.

Los valores de CPUE y densidad poblacional de la trucha por sitio y fecha de muestreo se describen en la tabla 10.

Tabla 10. Captura-por-unidad-esfuerzo (CPUE) de la trucha endémica (*O. m. nelsoni*) para una sección de arroyo de 200 metros de longitud en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, durante el período 1995-2019.

Sitio (transecto, fecha) CUENCA RÍO SANTO DOMINGO	CPUE (Individuos/200 metros de longitud de arroyo)
Arroyo La Grulla	
(septiembre 2014)	42
(agosto 2015)	91
(septiembre 2016)	20
(abril 2017)	21
Arroyo El Potrero	
(septiembre 1995)	19
(enero 2001)	42
(mayo 2019)	48
Arroyo San Antonio de Murillos	
(octubre 1995)	37
(enero 2001)	10
(septiembre 2010)	5
(mayo 2014)	16
(abril 2015)	28

Fuente:

Ruiz-Campos et al. (2014)

Ruiz-Campos (2017)

Esta investigación

La densidad poblacional de la trucha en los diferentes sitios y fechas de muestreo se detalla a continuación.

La Grulla (30°53'31.23"N, 115°28'55.82"O, altitud 2,080 msnm). Tres eventos de muestreo fueron analizados en este arroyo (Figura 44A): septiembre 2014, agosto 2015 y septiembre 2016. Del primer al segundo periodo, hubo un aumento considerable de más del 200% (septiembre de 2014, 0.024 individuos/m²; y agosto de 2015, 0.052 individuos/m²). Sin embargo, en el muestreo de septiembre de 2016, la densidad disminuyó de manera dramática en más de un 400%, de 0.052 a 0.012 individuos/m²). Esta última densidad fue similar a aquellas de abril de 2017.

El Potrero (30°54'59.80"N, 115°38'44.40"O, altitud 950 msnm). En este arroyo, se analizaron tres eventos de muestreo (Figura 44B) correspondientes a septiembre 1995, enero 2001 y mayo 2019. La densidad poblacional en esta localidad fue incrementando entre eventos de 0.036 individuos/m² a 0.090 individuos/m².

San Antonio de Murillos (localidad tipo) (30°49'5.12"N, 115°37'50.24"O, altitud 553 msnm). La densidad de truchas en este arroyo fue analizada en cinco eventos de muestreo (octubre 1995, enero 2001, septiembre 2010, mayo 2014 y abril 2015, Figura 44C). La densidad poblacional mostró un descenso considerable de octubre de 1995 a enero de 2001, teniendo valores de 0.055 y 0.025 individuos/m², respectivamente.

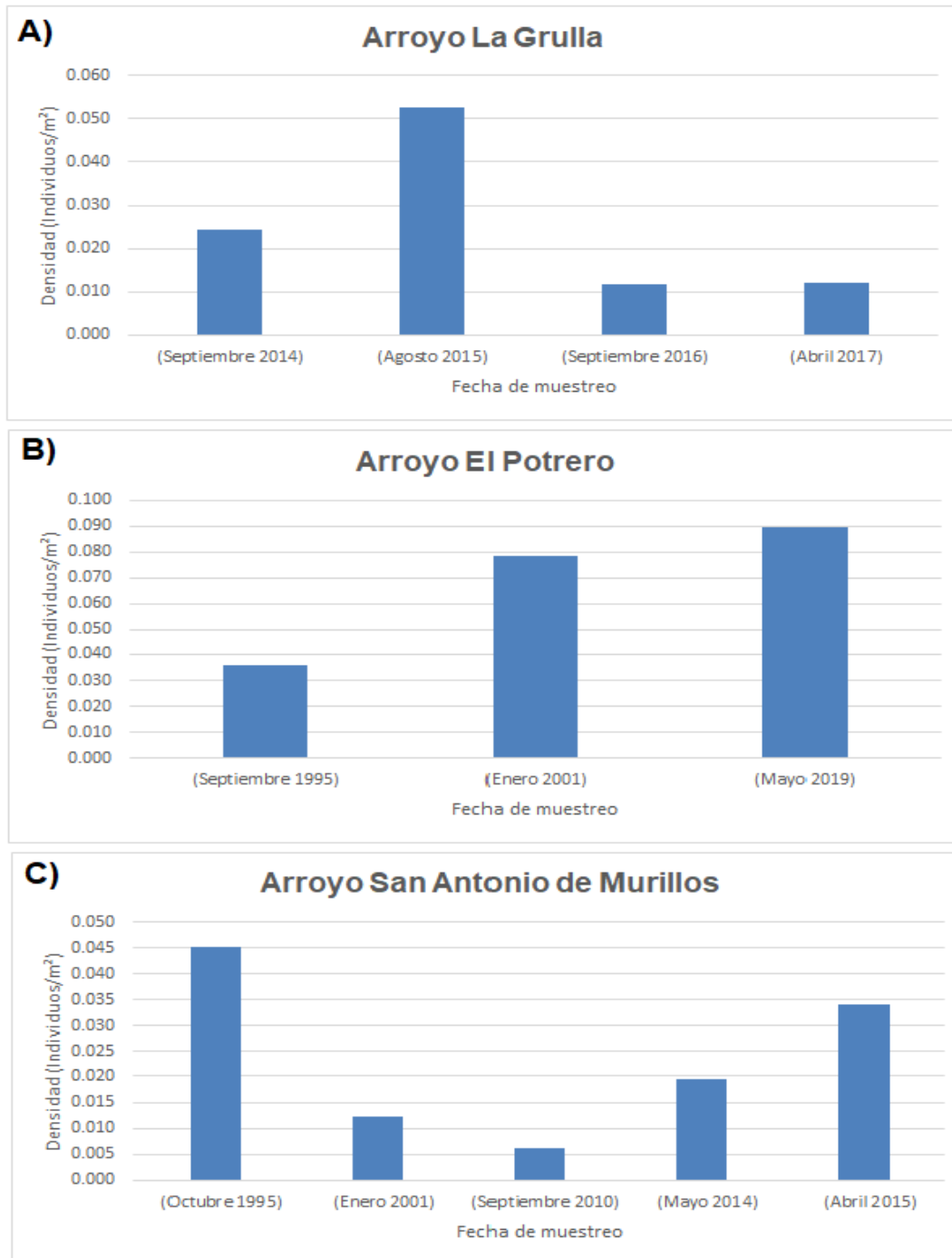


Figura 44. Densidad poblacional de la trucha endémica (*O. m. nelsoni*) en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, durante el período 1995-2019.

8.1.5 Identificación de las unidades de hábitat (Evaluación del patrón de paisaje)

En esta sección se delimitan y caracterizan cada una de los sitios de estudio en relación a las unidades de hábitat presentes (Figs. 45-47).

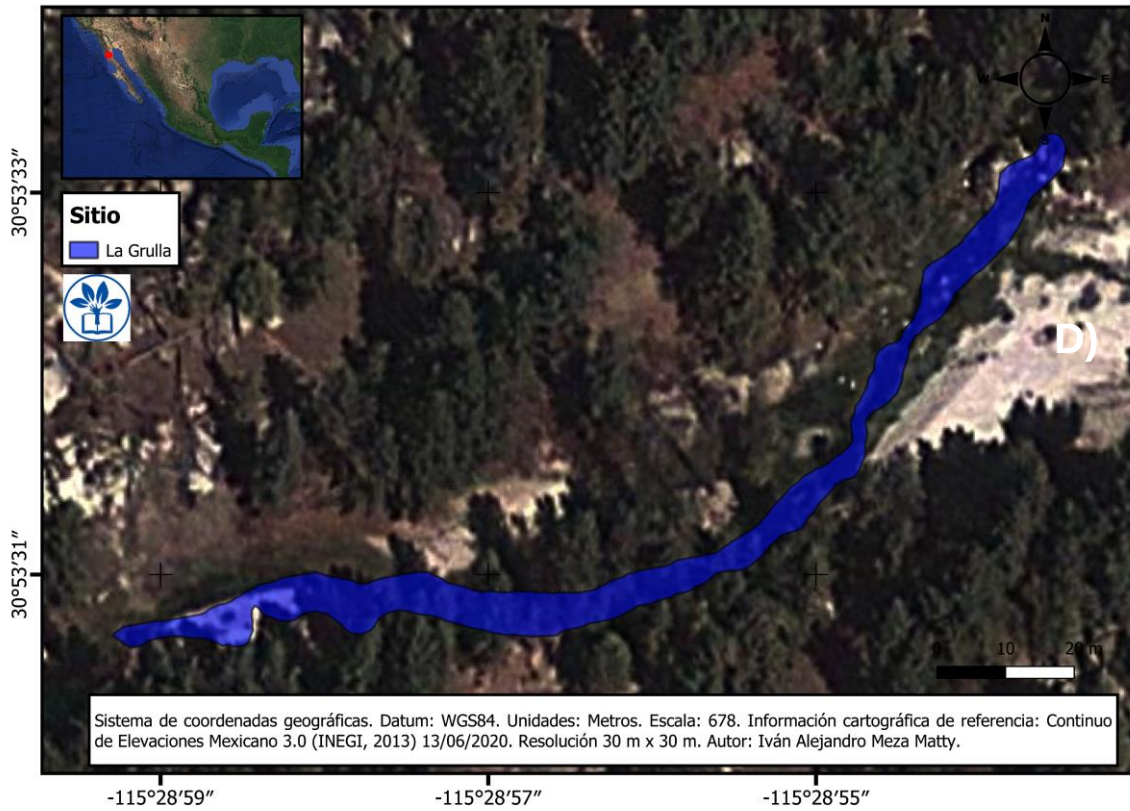


Figura 45. Transecto muestreado en el sitio del arroyo La Grulla, Baja California, México.

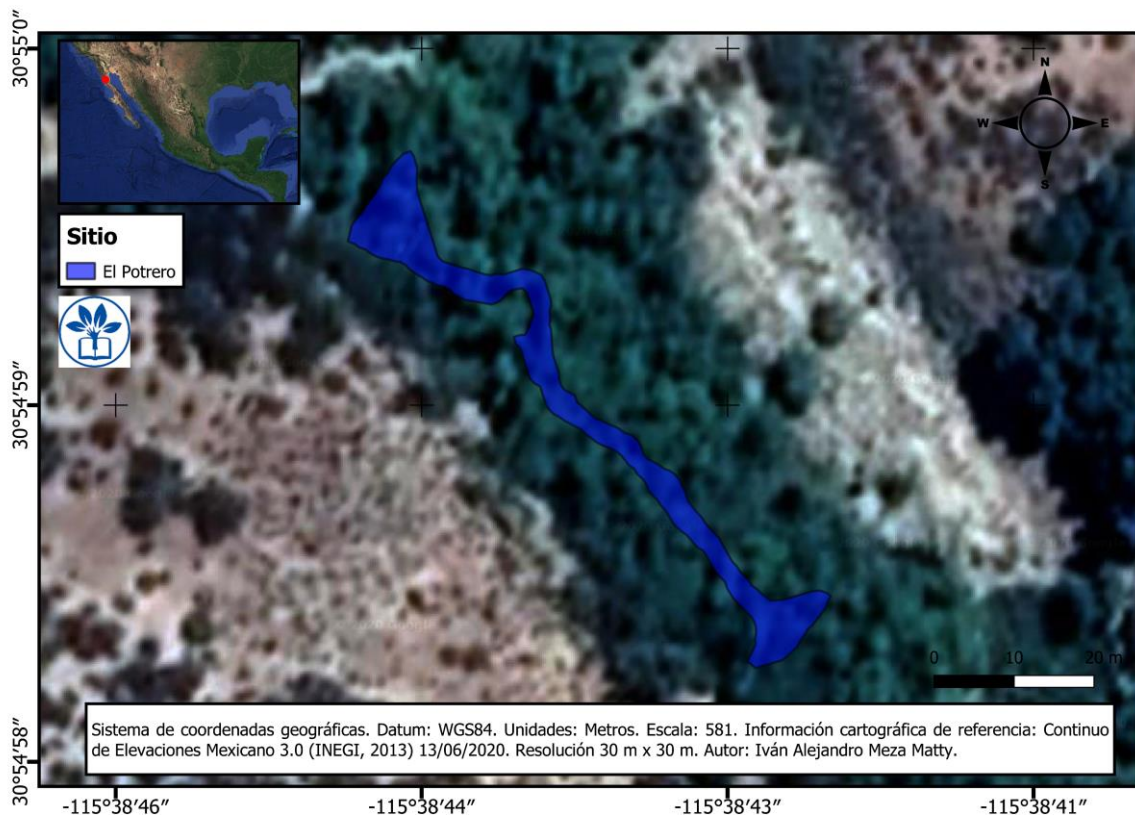


Figura 46. Transecto muestreado en el sitio del arroyo El Potrero, Baja California, México.



Figura 47. Transecto muestreado en el sitio del arroyo San Antonio de Murillos, Baja California, México.

Durante el análisis a nivel paisajístico de las unidades de hábitat a partir de imágenes y videos obtenidos con cámara fotográfica y dron, respectivamente, se identificaron las unidades de hábitat dentro de un segmento del arroyo de cada sitio de estudio. Dicha identificación se basó en la guía de identificación de unidades de hábitat para peces salmónidos en los drenajes del Pacífico de Norteamérica (USDA-USFS, 1990). En la tabla 11 se muestran las unidades de hábitat identificadas en cada uno de los sitios de estudio en la cuenca del río Santo Domingo, con las siguientes longitudes del transecto muestreado (La Grulla, 179.1 m; El Potrero, 71.1 m; y San Antonio de Murillos, 277 m).

Tabla 11. Unidades de hábitats identificadas en cada una de las localidades de estudio (La Grulla, El Potrero y San Antonio de Murillos), localizadas en la cuenca del río Santo Domingo durante el año 2019. PEC = Poza de erosión central, CFL = Corriente de flujo laminar, PES = Poza de escalón, COR = Corriente, PCC = Poza de canal de confluencia, PEL = Poza de erosión lateral, COE= Corriente escalonada.

Localidad/longitud de transecto (m)	Unidades de hábitat						
	PEC	CFL	PES	COR	PCC	PEL	COE
La Grulla/179.1	X						X
El Potrero/71.1			X	X	X	X	
San Antonio de Murillos/277	X	X	X	X		X	

Siete unidades de hábitat fueron identificadas en los tres sitios de estudio combinados. En el sitio de arroyo La Grulla se identificaron dos unidades de hábitat (PEC y COE), siendo el sitio con el menor número de tipos de unidades de hábitat. En el sitio de arroyo El Potrero, cuatro unidades de hábitat (PES, COR, PCC y PEL) fueron identificadas. Por último, en el sitio de arroyo San Antonio de Murillos se identificaron cinco unidades de hábitat (COR, PEL, CFL, PEC y PES), siendo este sitio el que registró una mayor diversidad de unidades de hábitat en este estudio.

A continuación, se muestran las diferentes unidades de hábitat identificadas en las localidades de estudio (Fig. 48).



Figura 48. Clasificación de unidades de hábitat en los sitios de arroyo de estudio en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. A) Poza de erosión central (PEC), B) Corriente de flujo laminar (CFL), C) Poza en escalón (PES), D) Corriente (COR), E) Poza de canal de confluencia (PCC), F) Poza de erosión lateral (PEL) y G) Corriente en Escalón (COE). Fotografías por Gorgonio Ruiz-Campos.

Durante el muestreo de abril de 2017 (sitio La Grulla), en la unidad de hábitat “COE” se capturaron 10 especímenes de trucha, mientras que en la unidad “PEC” fueron atrapados nueve individuos, dando ambos un total de 19 especímenes (Tabla 12). Por otro lado, el muestreo más reciente (mayo 2019) efectuado en el sitio El Potrero arrojó un total de 17 especímenes de trucha, siendo “PEL” la unidad de hábitat con mayor abundancia de truchas ($n = 7$), seguido de “COR” con cuatro individuos. Por último, en el sitio San Antonio de Murillos, el muestreo más actualizado (abril de 2015) de acuerdo con Solís-Mendoza, 2016), registró 36 individuos, donde las unidades de hábitat “COR, CFL, PEC y PES” presentaron la misma cantidad de individuos ($n = 8$), mientras que el hábitat “PEL” fue el que presentó la menor abundancia con cuatro individuos. De manera conjunta, combinando los tres sitios de estudio, la unidad de hábitat que registró mayor cantidad de individuos fue “PEC” con 17 especímenes, seguido de “COR” con 12 individuos. El hábitat que presentó la menor incidencia de individuos capturados fue “PCC” ($n = 3$, Tabla 12).

Tabla 12. Número de individuos de *O. m. nelsoni* por unidad de hábitat en los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México. *= No se identificó esta unidad de hábitat en esa fecha. Poza de erosión central (PEC), Corriente de flujo laminar (CFL), Poza en escalón (PES), Corriente (COR), Poza de canal de confluencia (PCC), Poza de erosión lateral (PEL) y Corriente en Escalón (COE).

Unidad de hábitat	San Antonio de Murillos	La Grulla	El Potrero	Total
	abr-15	abr-17	may-19	
PEC	8	9	*	17
COR	8	*	4	12
PES	8	*	3	11
PEL	4	*	7	11
COE	*	10	*	10
CFL	8	*	*	8
PCC	*	*	3	3

8.1.5.1 Distribución espacial

Basado en los análisis de los últimos muestreos realizados en cada localidad (San Antonio de Murillos, abril de 2015 (Solís-Mendoza, 2016), La Grulla, abril de 2017 (Ruiz-Campos, 2017) y El Potrero, mayo de 2019 (Efectuado en este estudio), la distribución espacial de la trucha de la SSPM en los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo fue de tipo metapoblacional. En este contexto, los grupos formados se encuentran separados en los sitios estudiados. Sitios en la cuenca del río Santo Domingo se encuentran desconectados la mayor parte del año y solo existe conectividad cuando se presentan fuertes crecientes, durante la temporada de lluvias en invierno.

Para el muestreo de abril de 2015, se obtuvo el principal grupo poblacional dentro de la zona delimitada con un área total de 264 m², correspondiente a dos unidades de hábitat “CFL y PEC” con una densidad poblacional de 0.0043 individuos/m² en el sitio arroyo San Antonio de Murillos, formando así un continente de dispersión de la subespecie endémica de trucha debido a la cercanía y conexión entre ellas (Fig. 49). Para el muestreo de abril de 2017, se obtuvo el grupo poblacional principal dentro del parche correspondiente a la unidad de hábitat “COE” con un área total de 296 m² y una densidad poblacional de 0.0126 individuos/m² en el sitio arroyo La Grulla (Fig. 50). Por último, en el sitio El Potrero, en el muestreo de mayo de 2019, el grupo poblacional principal obtenido dentro del parche correspondió a la unidad de hábitat “PEL” con una densidad de 0.0206 individuos/m² y un área de 31 m² (Fig. 51).



Figura 49. Distribución metapoblacional de la trucha *O. m. nelsoni*, en el sitio de muestreo del arroyo San Antonio de Murillos", cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, durante abril de 2015.

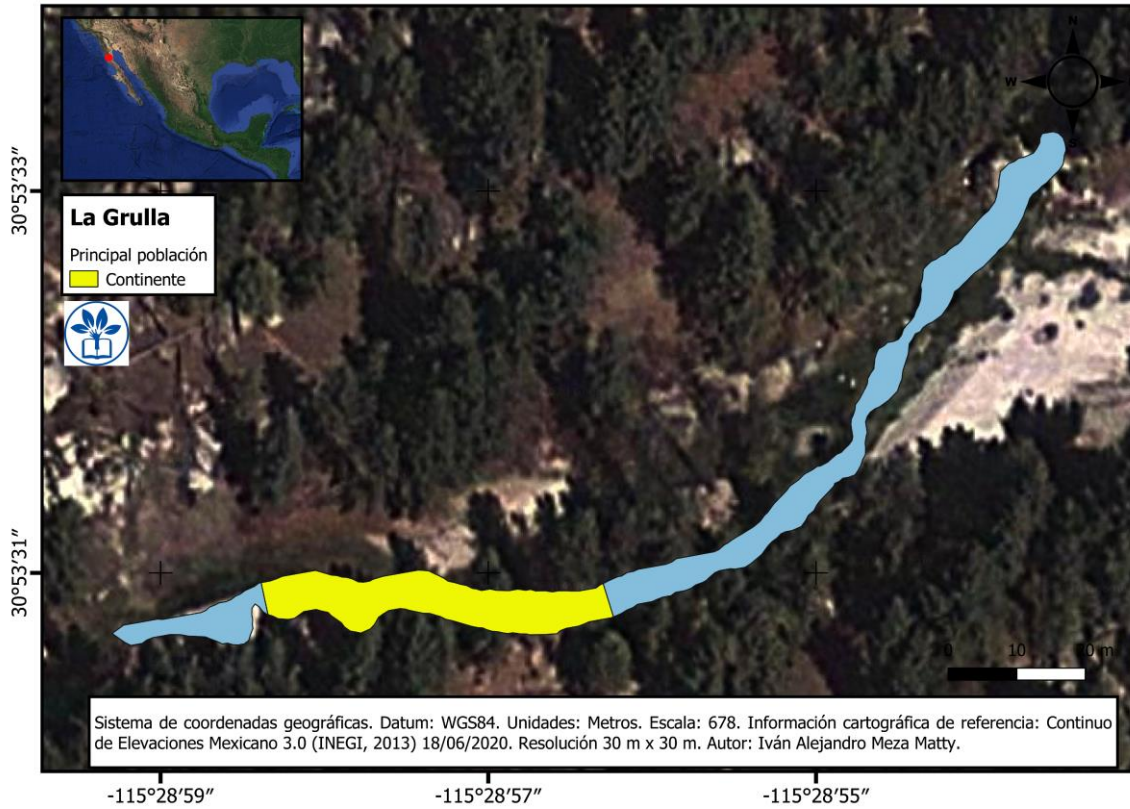


Figura 50. Distribución metapoblacional de la trucha *O. m. nelsoni*, en el sitio de muestreo del arroyo La Grulla, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, durante abril de 2017.

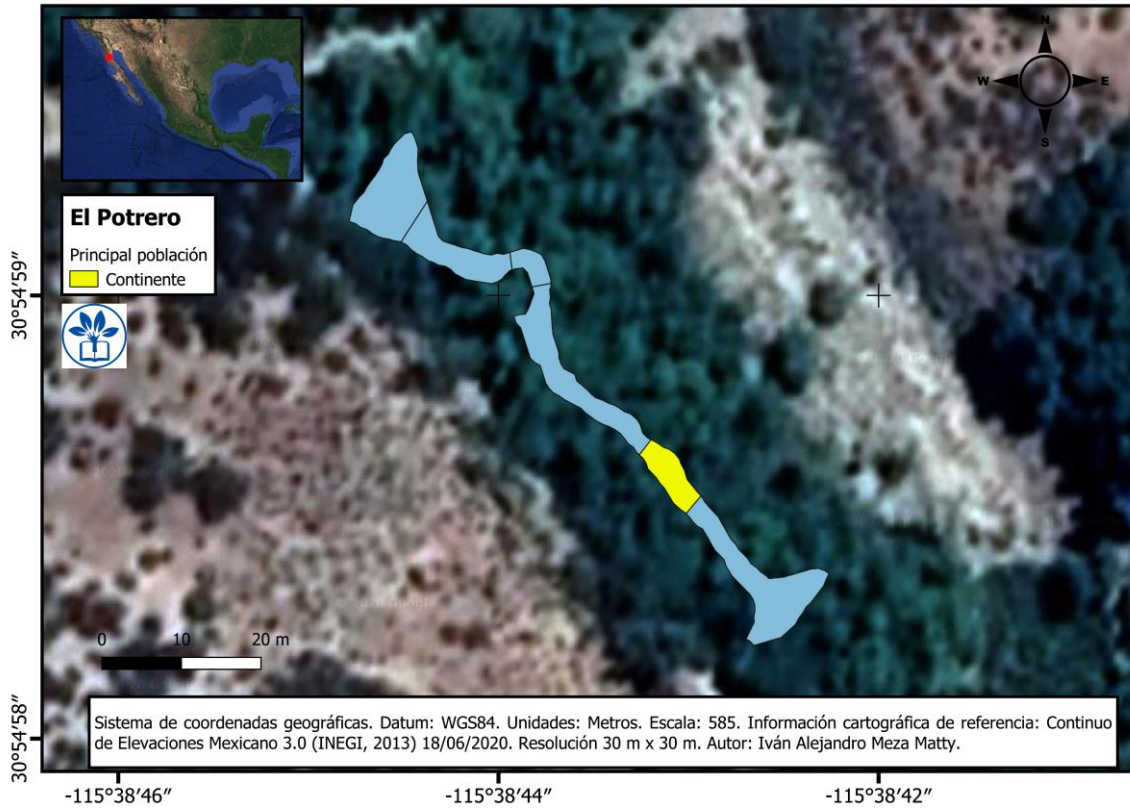


Figura 51. Distribución metapoblacional de la trucha *O. m. nelsoni*, en el sitio de muestreo del arroyo El Potrero, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, durante mayo de 2019.

8.1.5.2 Patrón del paisaje

La identificación y caracterización del patrón del paisaje del área de estudio fue basada en la documentación y evaluación de imágenes fotográficas y videos obtenidos durante los muestreos realizados en esta investigación, así como imágenes satelitales recuperados de Google Earth tipo Landsat/Copernicus y observaciones tomadas en campo. Como resultado de dicho análisis, se encontró que en los tres sitios de muestreo estudiados (La Grulla, El Potrero y San Antonio de Murillos) se reconocieron siete unidades de hábitat: PEC = Poza de erosión central, CFL = Corriente de flujo laminar, PES = Poza de escalón, COR = Corriente, PCC = Poza de canal de confluencia, PEL = Poza de erosión lateral y COE = Corriente escalonada, como se indican en las figuras 52-57.



Figura 52. Caracterización del paisaje actual en el sitio de muestreo del arroyo La Grulla, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 15 de abril de 2019. A) Imagen in situ tomada con Dron (Fotografía: Iván Alejandro Meza Matty. B) Mapa generado en el Sistema de Información Geográfica Quantum GIS versión 3.8.1. PEC = Poza de erosión central, COE = Corriente escalonada.

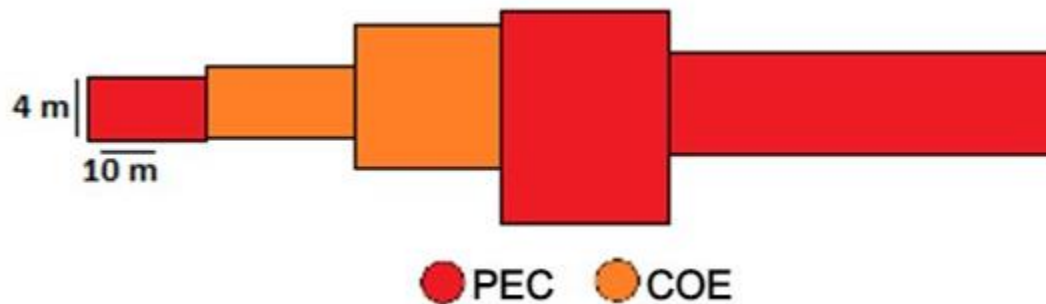


Figura 53. Mapa esquemático del área estimada por tipo de unidad de hábitat en el sitio de muestreo del arroyo La Grulla, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 15 de abril de 2019. PEC = Poza de erosión central, COE = Corriente escalonada.

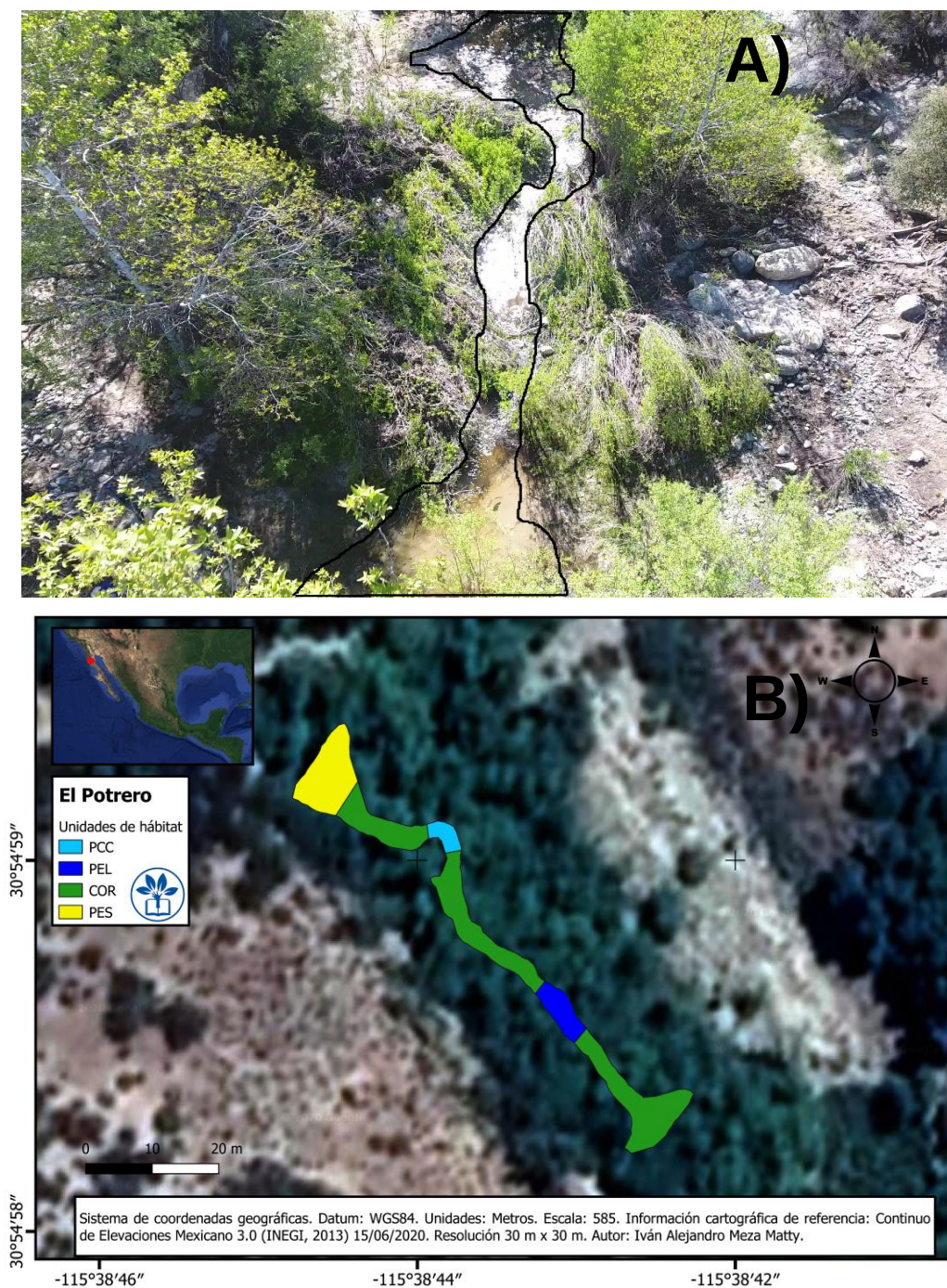


Figura 54. Caracterización del paisaje actual en el sitio de muestreo del arroyo El Potrero, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 4 de mayo de 2019. A) Imagen in situ tomada con Dron (Fotografía: Iván Alejandro Meza Matty. B) Mapa generado en el Sistema de Información Geográfica Quantum GIS versión 3.8.1. PES = Poza de escalón, COR = Corriente, PCC = Poza de canal de confluencia, PEL = Poza de erosión lateral.

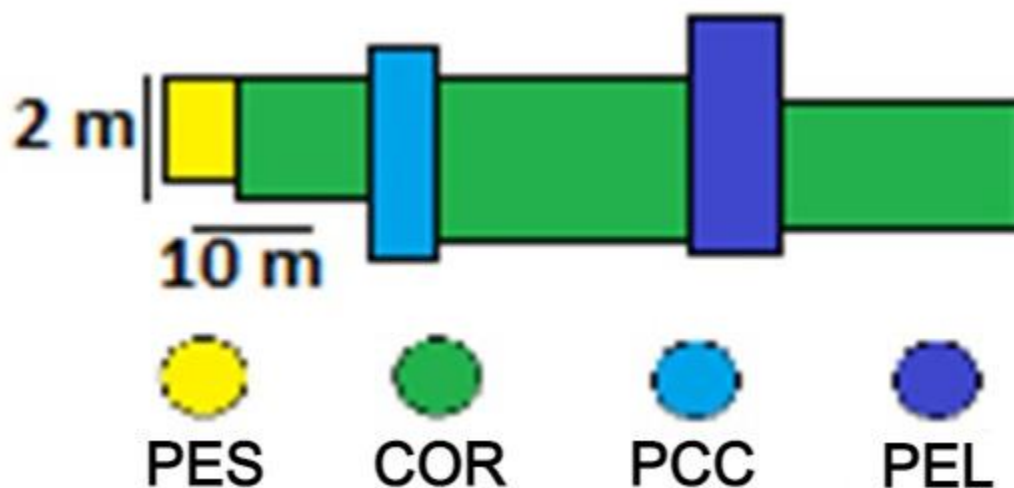


Figura 55. Mapa esquemático del área estimada por tipo de unidad de hábitat en el sitio de muestreo del arroyo El Potrero, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 4 de mayo de 2019. PES = Poza de escalón, COR = Corriente, PCC = Poza de canal de confluencia, PEL = Poza de erosión lateral.

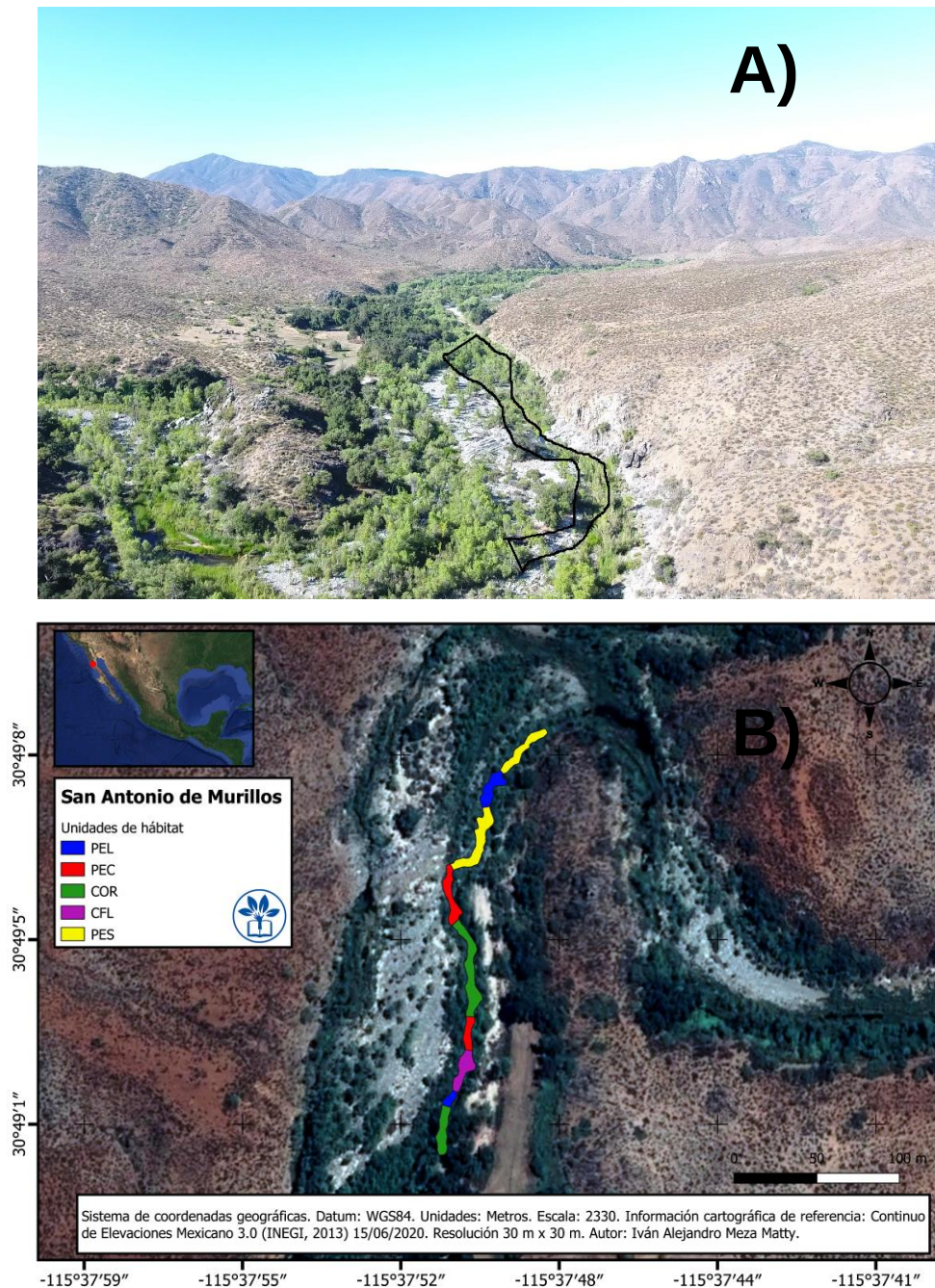


Figura 56. Caracterización del paisaje actual en el sitio de muestreo del arroyo San Antonio de Murillos, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 26 de junio de 2019. A) Imagen in situ tomada con Dron (Fotografía: Iván Alejandro Meza Matty. B) Mapa generado en el Sistema de Información Geográfica Quantum GIS versión 3.8.1. COR= Corriente, PEL = Poza de erosión lateral, CFL = Corriente de flujo laminar, PEC = Poza de erosión central, PES = Poza de escalón.

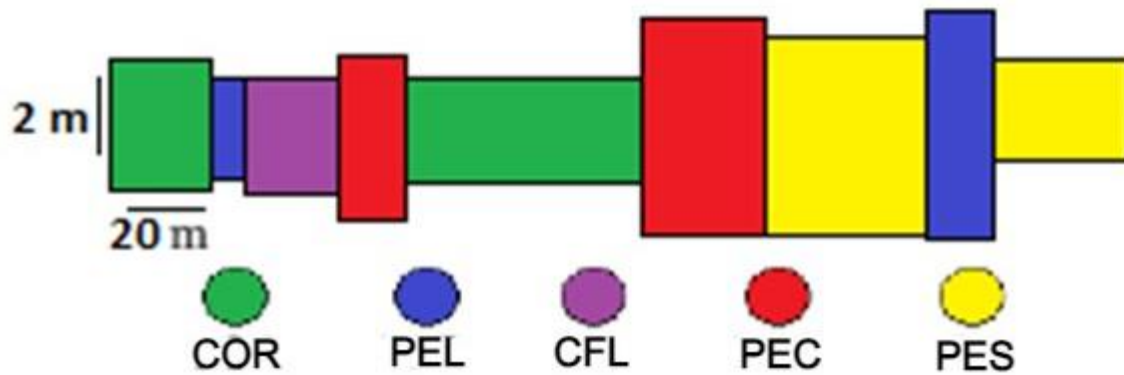


Figura 57. Mapa esquemático del área estimada por tipo de unidad de hábitat en el sitio de muestreo del arroyo San Antonio de Murillos, localizado en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 26 de junio de 2019. COR= Corriente, PEL = Poza de erosión lateral, CFL = Corriente de flujo laminar, PEC = Poza de erosión central, PES = Poza de escalón.

Así mismo, se obtuvo el total de parches de cada unidad de hábitat, donde el de mayor presencia a nivel de parches fue “COR” con cinco fragmentos, en contraste con los tipos “CFL, COE y PCC” con solo un parche (Tabla 13). Respecto a la proporción de área cubierta por tipo de unidad de hábitat (CAP), el tipo “PEC” presentó la mayor cobertura con un 28.07% para los tres sitios de muestreo combinados. Por su parte, el hábitat “PCC” ocupó la menor cobertura con solo el 0.55% del área de estudio (Figura 58).

Tabla 13. Número de parches de cada hábitat y la proporción de área por tipo de hábitat en los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California. Tipos de unidades de hábitat: PEC = Poza de erosión central, CFL = Corriente de flujo laminar, PES = Poza de escalón, COR = Corriente, PCC = Poza de canal de confluencia, PEL = Poza de erosión lateral, COE = Corriente escalonada.

Unidad de hábitat	Número de parches (PN)	Área cubierta por clase (CAP) (m ²)	Porcentaje de área por clase (CAP) (%)
PEC	4	771	28.07
COR	5	716	26.06
PES	3	541	19.69
CFL	1	296	10.78
PEL	3	241	8.77
COE	1	167	6.08
PCC	1	15	0.55
Total	18	2747	100

Porcentaje de área por clase (CAP)

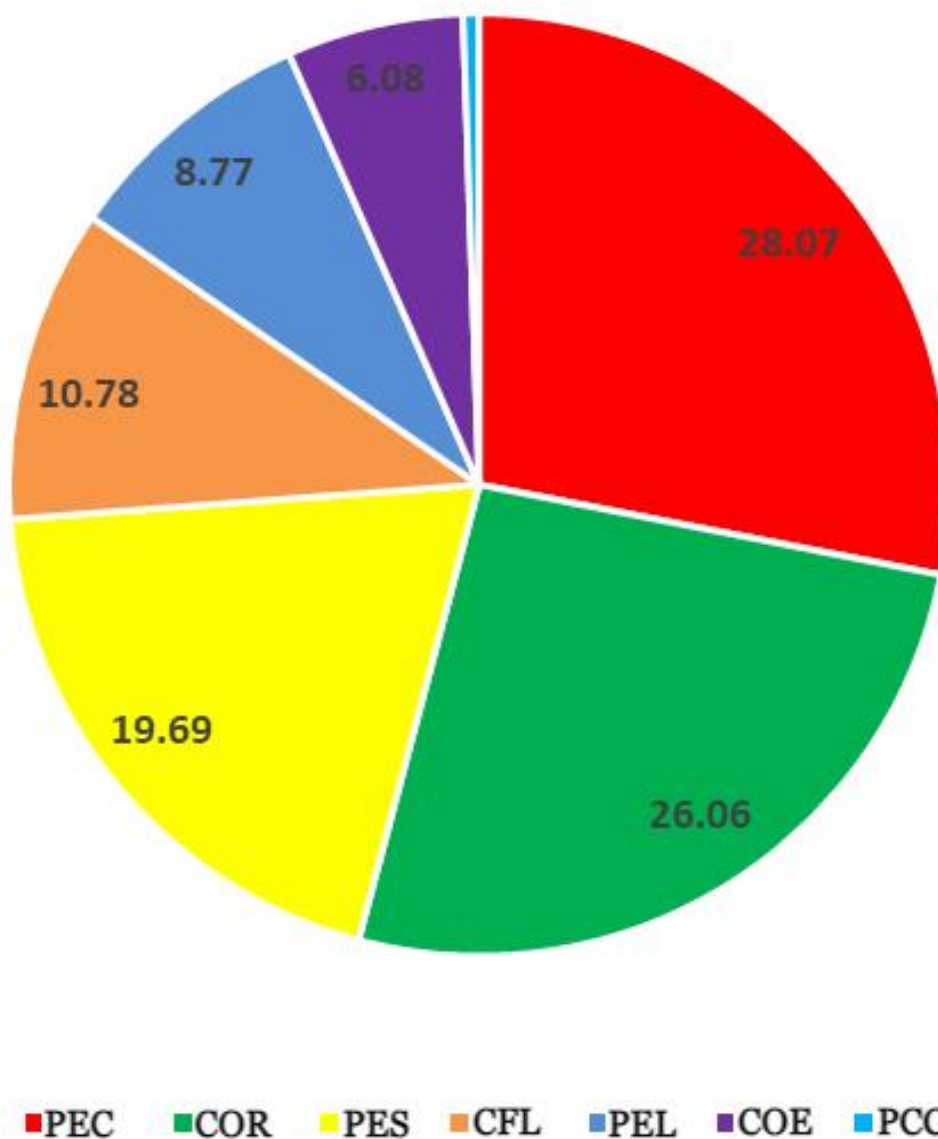


Figura 58. Porcentaje de área cubierta por tipo de hábitat en los sitios de muestreo de los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California. Tipos de unidades de hábitat: PEC = Poza de erosión central, CFL = Corriente de flujo laminar, PES = Poza de escalón, COR = Corriente, PCC = Poza de canal de confluencia, PEL = Poza de erosión lateral, COE = Corriente escalonada.

Usando la relación de la abundancia poblacional de *O. m. nelsoni* para las diferentes unidades de hábitat en los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, se generó la distribución potencial de esta subespecie a partir del indicador DIPOT. Este indicador fue calculado para los 18 parches resultantes del ámbito de dispersión de esta trucha a través de los arroyos del área de estudio, obteniendo así cuatro clasificaciones de distribución potencial (Bajo, Medio, Alto y Muy Alto). El potencial Alto fue la clasificación más dominante del paisaje con diez unidades, seguidas del potencial Bajo con cinco unidades. El potencial menos dominante resultó ser el potencial Muy Alto con una unidad (Tabla 14 y Figs. 59-61).

Tabla 14. Número de parches con tipo de distribución potencial de *Oncorhynchus mykiss nelsoni*, pertenecientes a los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California.

Localidad	Distribución potencial de <i>O. m. nelsoni</i>			
	Muy Alto	Alto	Medio	Bajo
La Grulla	0	2	1	0
El Potrero	1	2	0	3
San Antonio de Murillos	0	6	1	2
TOTAL	1	10	2	5

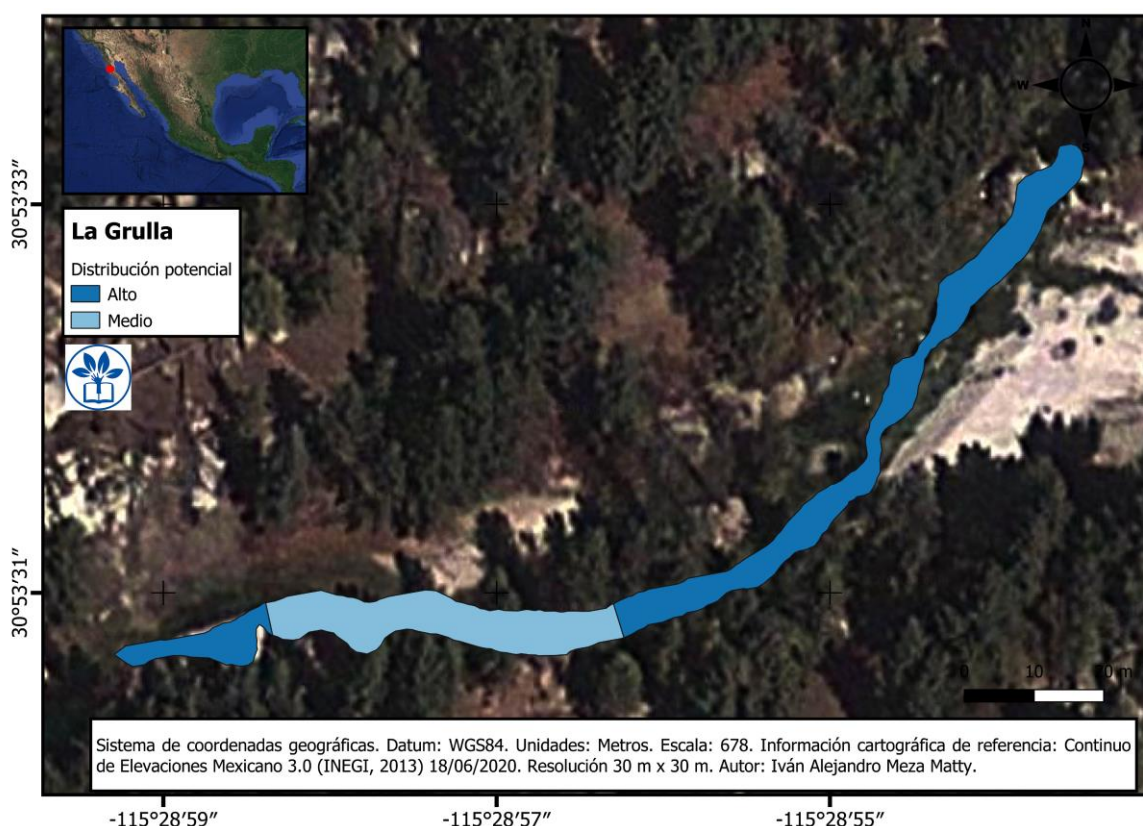


Figura 59. Distribución potencial del pez endémico *Oncorhynchus mykiss nelsoni* en el sitio de muestreo del arroyo La Grulla, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 29 de abril de 2017.

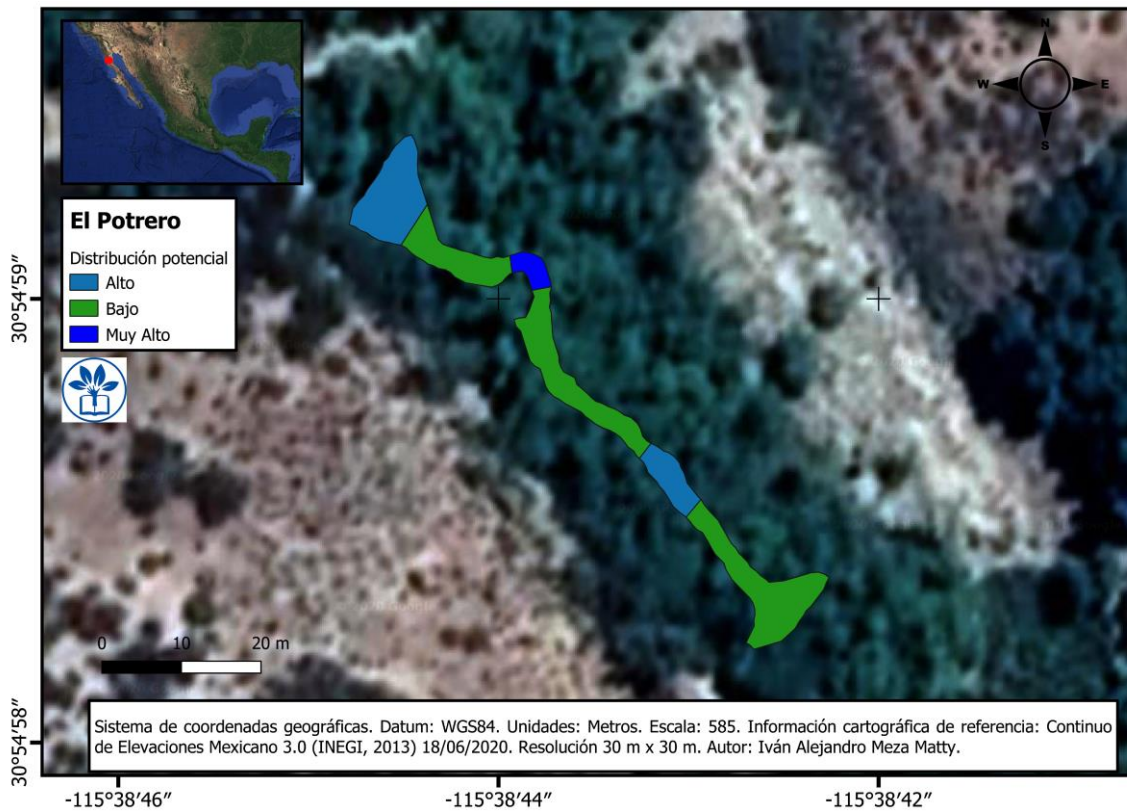


Figura 60. Distribución potencial del pez endémico *Oncorhynchus mykiss nelsoni* en el sitio de muestreo del arroyo El Potrero, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 4 de mayo de 2019.



Figura 61. Distribución potencial del pez endémico *Oncorhynchus mykiss nelsoni* en el sitio de muestreo del arroyo San Antonio de Murillos, cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, el día 26 de junio de 2019.

Considerando solo los hábitats con dos o más parches en la zona de estudio (PEC, COR, PES y PEL), la fragmentación calculada con la métrica de paisaje PROX fue más alta para el hábitat PES con un valor de 1.918, mientras que el hábitat PEL resultó ser el de menor valor con 0.003. Valores bajos en la métrica indicaron un alto nivel de fragmentación en el tipo de cobertura.

Para obtener el grado de conexión del sistema se hizo uso de la métrica de paisaje ENN. Valores altos indican coberturas con menor grado de conexión. De esta manera, la cobertura con mayor conexión resultó ser el hábitat COR, seguido del hábitat PES. El de menor conexión fue el hábitat MCP (Tabla 15).

Tabla 15. Coberturas y resultado de las métricas PROX y ENN para los sitios de arroyo muestreados en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, durante el periodo 2017-2019. Tipos de unidades de hábitat: PEC = Poza de erosión central, CFL = Corriente de flujo laminar, PES = Poza de escalón, COR= Corriente, PCC = Poza de canal de confluencia, PEL = Poza de erosión lateral, COE = Corriente escalonada.

Tipo de hábitat	Promedio total (PROX)	Promedio total (ENN)
PEC	0.498	4120.530
COR	0.058	2209.100
PES	1.918	3650.213
CFL	0	0
PEL	0.003	3743.877
COE	0	0
PCC	0	0

8.2 Fuerzas Motrices, Presión, Impacto y Respuesta

8.2.1 Análisis documental

Para la identificación de las Fuerzas Motrices, Presión, Impacto y Respuesta citadas en trabajos previos se eligieron aquellos documentos cuya información es relevante y significativa en este apartado. Esta elección fue obtenida a partir de la búsqueda documental (fuentes primarias: dos libros, doce artículos científicos y cinco tesis). La información encontrada se presenta en la tabla 16.

Tabla 16. Fuerzas Motrices, Presión, Impacto y Respuesta identificadas en trabajos previos en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.

Actividad antropogénica o natural	Fuerza Motriz	Presión	Impacto actual o futuro y literatura	Respuesta
Antropogénica	Agricultura	Construcción de obras hidráulicas (represas, presas, canales de irrigación, etc.)	Alteración en el flujo y cobertura de los arroyos (Marcus et al., 1990).	No se encontró
	Ganadería	Sobrepastoreo y pisoteo del terreno	Azolvamiento del canal del arroyo por compactación del suelo (Ruiz-Campos, 2017) Eutrofización por heces fecales, perjudicando a los salmónidos, provocando asfixia y posteriormente, la muerte (ProMED, 2016, González-De La Barrera, 2021).	Ésta subespecie es mencionada en la última actualización del programa de conservación y manejo del Parque Nacional sierra San Pedro Mártir (CONANP, 2009), sin embargo, el polígono del parque solo abarca hasta la localidad la Grulla.
	Turismo	Pesca ilegal	Disminución en las poblaciones de trucha <i>O. m. nelsoni</i> (Ruiz-Campos, 2017)	Esta trucha se encuentra actualmente en la categoría de preocupación especial por el Comité de Peces en Peligro de Extinción de la American Fisheries Society (Jelks et al., 2008), así como

				en protección especial por el gobierno mexicano a través de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2010.
	Acuicultura o pesca	Introducción de especies exóticas	Competencia de hábitat, alimento, etc) (Ruiz-Campos et al., 2000, 2014b).	No se encontró
Natural	Calentamiento global	Aumento de la temperatura promedio actual (mayor cantidad de eventos extremos $\geq 28^{\circ}\text{C}$)	Los peces expuestos a temperaturas por arriba de este umbral experimentan un estrés fisiológico celular que incluye la síntesis de proteínas de golpe calórico (<i>heat shock protein, HSP por sus siglas en inglés</i>) provocándoles la muerte (Lund et al., 2002).	No se encontró

8.2.2 Observaciones en campo

La documentación en este apartado fue basada en imágenes obtenidas en el área de estudio el día 25 de junio de 2019. En la figura 62 podemos observar una red de tubería a través de los caminos de acceso hacia la parte alta de la sierra San Pedro Mártir. En ese tiempo que se obtuvieron las fotografías, dicha red no estaba aún en operación. Tampoco fue posible saber el lugar de origen de esta tubería donde se extraerá el agua, debido a que buena parte de estos terrenos se encuentran con acceso restringido al ser propiedades privadas.

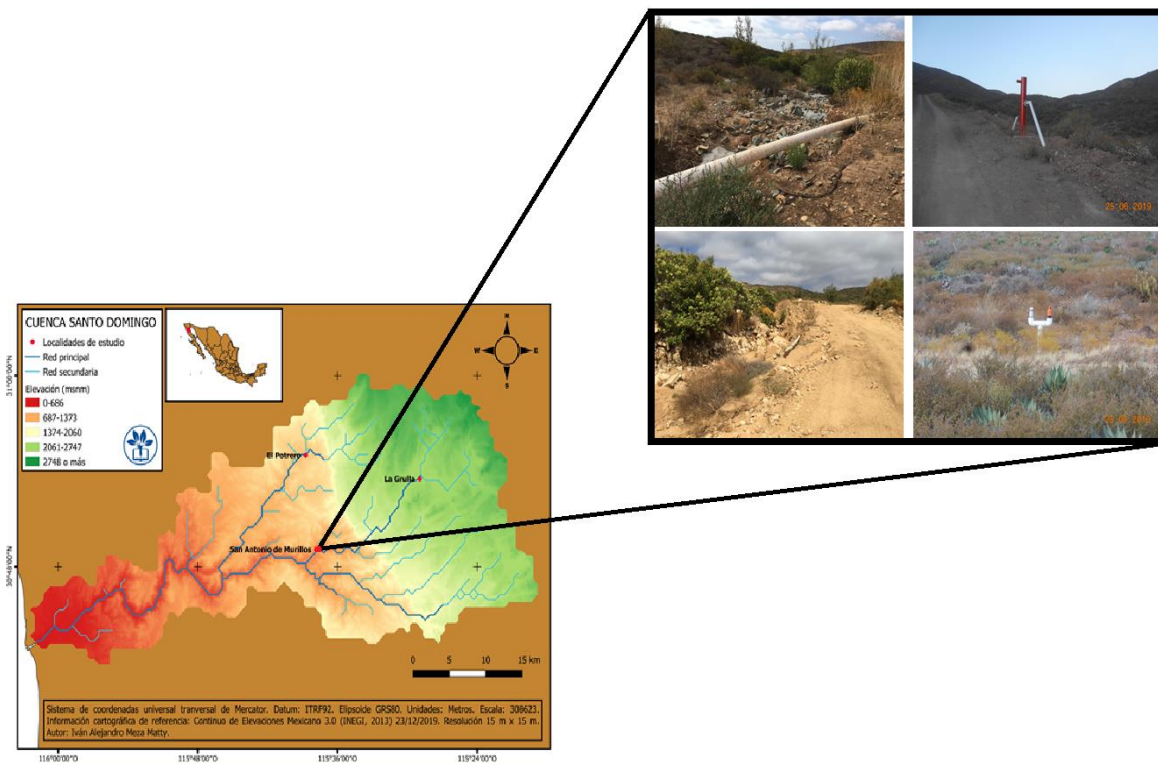


Figura 62. Red de tuberías detectadas el 25 de junio de 2019 en la parte media de la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Baja California, México.

En la figura 63 se observa que hay actividad de ganadería a lo largo de la ciénega ubicada en la localidad La Grulla. Este sitio ha sido aprovechado por los ganaderos locales para el pastoreo de reses durante las estaciones de verano y parte del otoño, lo cual ha provocado impacto en la estructura de la vegetación y fauna que habita en esta ciénega, especialmente aquellas especies de tipo endémico.



Figura 63. Actividad ganadera en septiembre de 2018 en la pradera de La Grulla, adyacente al arroyo de estudio, donde se aprecia el efecto de pastoreo intensivo y el pisoteo del suelo. Fotografía Iván Alejandro Meza Matty.



Figura 64. Alteración de la planicie de inundación y bancos de una sección de arroyo por efecto de pisoteo del ganado vacuno en la sierra San Pedro Mártir, Baja California, México, en un segmento del arroyo de la localidad La Grulla en septiembre de 2018. Fotografía Gorgonio Ruiz Campos.

En la figura 64 se encontró evidencia de suelo compactado producto del paso de la ganadería a lo largo de los cuerpos de agua de la localidad La Grulla, debido al pisoteo del ganado en los bancos de los arroyos, promoviendo la erosión de los mismos y el azolvamiento del canal del arroyo, así como también, pérdida de vegetación que provee sombra a las pozas y mantiene condiciones térmicas apropiadas para la trucha endémica *O. m. nelsoni*. Así mismo, las heces fecales del ganado que son vertidas directamente en el lecho del arroyo y que contienen compuestos nitrogenados y de fósforo ocasionan el aumento de bacterias coliformes en el agua del arroyo y la eutrofización de las pozas disminuyendo la cantidad de oxígeno disponible del agua para éstas truchas.

En la figura 65 se puede observar un cambio drástico en la vegetación antes y después del paso de la ganadería (abril 2017 y septiembre 2018), así como una alta recuperación de la vegetación en abril 2019, indicando que durante la actividad ganadera observada durante esta investigación, la densidad y biomasa de la vegetación disminuyeron, alterando la heterogeneidad espacial y disminución de la productividad del hábitat, promoviendo una alteración en el ciclo de nutrientes, erosión, compactación del suelo y el régimen de fuegos, simplificando la estructura vertical de la vegetación, reduciendo la cobertura y alimento para la fauna silvestre presente en la ciénega La Grulla. Por lo cual es importante que se prohíba la actividad ganadera de manera permanente en las praderas del PNSSPM, debido a los efectos del pastoreo que ejerce presión en la abundancia de especies de mamíferos nativos y en la integridad de los hábitats tanto de pastizal como del humedal, donde habitan formas endémicas como el ratón meteoro de California (*Microtus californicus hyperuthrus*), la rana de patas rojas (*Rana draytonii*) y la trucha de San Pedro Mártir (*Oncorhynchus mykiss nelsoni*).



Figura 65. Imágenes de la ciénaga La Grulla en diferentes años, mostrando los cambios en la densidad y cobertura del pastizal sin actividad de pastoreo (A: abril 2017, y C: abril 2019) y con actividad de pastoreo (B: septiembre 2018) por ganado. Fotografías Aldo A. Guevara Carrizales (A) Iván Alejandro Meza Matty y Gorgonio Ruíz Campos (B y C).

8.2.3 Análisis de amenazas

Como resultado del análisis de amenazas para los sitios de estudio, se obtuvo el coeficiente de ponderación para la asignación de valores, encontrando que el arroyo “San Antonio de Murillos” fue el que presentó el promedio mayor (3.5) en términos de contribución, rareza, calidad y valor de la herramienta, mientras que el arroyo La Grulla obtuvo el menor valor (2.5) (Tabla 17).

Tabla 17. Valores asignados para arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, durante el periodo 1994-2019.

Sistema de conservación	Contribución	Rareza	Calidad	Valor de la herramienta	Promedio
La Grulla	2	2	2	4	2.5
El Potrero	4	2	2	4	3
San Antonio de Murillos (localidad tipo)	4	2	4	4	3.5

Para los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo se identificaron cuatro impactos y trece causas de los mismos. Durante la evaluación de los impactos, se encontró que los de mayor severidad y alcance fueron el futuro declive poblacional de *O. m. nelsoni* y la reducción en los regímenes de flujo de los arroyos con un promedio de cuatro. El impacto que presentó menor severidad y alcance fue la contaminación del agua de los arroyos con un promedio de 1.5. Para los valores de las causas o fuentes, el aumento de la temperatura en los arroyos por cambio climático global, la agricultura (desvío del flujo del caudal para irrigación agrícola), los eventos de flujos extraordinarios después de tormentas y los desechos fecales por ganadería fueron los que obtuvieron el mayor valor que es cuatro, seguido de la construcción de obras hidráulicas (presas y represas) con un valor de tres; el resto de las causas obtuvo un valor de 2.25 o menor (Tabla 18).

Tabla 18. Puntuaciones de los Impactos y Fuentes en los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, durante el periodo 1994-2019.

Impacto	Severidad/ Alcance	Promedio del impacto	Causas/Amenazas	Actual/F utura	Promedio de la causa
Futuro declive poblacional de <i>O. m. nelsoni</i>	4/4	4	Afloramiento de microalgas en criaderos por acuicultura	1/2	1.5
			Aumento de la temperatura en los arroyos por cambio climático global	4/4	4
			Pesca ilegal	0.5/2	1.25
			Competencia de hábitat y alimento con especies exóticas	0.5/4	2.25
Reducción en los regímenes de flujo de los arroyos	4/4	4	Construcción de obras hidráulicas (presas y represas)	2/4	3
			Agricultura (desvío o canalización del flujo del caudal para irrigación agrícola)	4/4	4
Asolvamiento en los cuerpos de agua y remoción de la vegetación	2/4	3	Construcción de brechas o caminos	0.5/1	0.75
			eventos de flujos extraordinarios después de tormentas	4/4	4
			Incendios forestales	1/2	1.5
			Compactación de suelo por ganadería	2/2	2
Contaminación del agua de los arroyos	2/1	1.5	Desechos fecales por ganadería	4/4	4
			Hidrocarburos	0.5/2	1.25
			Lixiviación de minerales por minería	0.5/2	1.25

En la asignación de los valores de los impactos y sus fuentes para los arroyos de la cuenca Santo Domingo, con base en sus atributos de severidad y alcance, así como las condiciones actuales y futuras, se obtuvo que el mayor impacto hacia el sistema será la reducción en los regímenes de flujo de los arroyos, el cual obtuvo una puntuación de 324, clasificándola en la categoría de priorización “Alta”, seguido por el futuro declive poblacional de *O. m. nelsoni* con 252 puntos, posicionándose en la misma categoría “Alta”, después el asolvamiento en los cuerpos de agua y remoción de la vegetación entrando en la categoría “Media” con un total de 223 puntos. Por último, el impacto con menor valor será la contaminación del agua de los arroyos con solo una puntuación de 88, entrando en la categoría “Baja”.

En lo que respecta a los sistemas de conservación, el arroyo San Antonio de Murillos (localidad tipo) es el que se encontrará mayormente impactado, seguido se encontrará el arroyo El Potrero; y por último el arroyo La Grulla. Todos ellos impactados principalmente por la reducción en los regímenes de flujo de los arroyos (Tabla 19).

Tabla 19. Valores obtenidos para los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México, durante el periodo 1994-2019.

Objetos de conservación o sistema					
Impactos	La Grulla	El Potrero	San Antonio de Murillos (localidad tipo)	Total	Categoría
Reducción en los regímenes de flujo de los arroyos	90	108	126	324	Alta
Futuro declive poblacional de <i>O. m. nelsoni</i>	70	84	98	252	Alta
Asolvamiento en los cuerpos de agua y remoción de la vegetación	62	74	87	223	Media
Contaminación del agua de los arroyos	24	29	34	88	Baja
Amenaza total del sistema	246	296	345		

8.2.4 Análisis de riesgo (FISK)

Considerando que uno de los mayores impactos identificados en el anterior análisis, será el futuro declive poblacional de la trucha endémica *Oncorhynchus mykiss nelsoni*, cuya causa principal sería la competencia por hábitat y alimento con especies exóticas; en este sentido se identificó con la herramienta FISK cuál de las especies ícticas exóticas presentes en la cuenca baja del río Santo Domingo tendrá un mayor potencial de invasividad en el área de estudio. La especie que resultó ser la de mayor invasividad fue la mojarra verde *Lepomis cyanellus* con un índice de 27, obteniendo además un nivel de umbral de alto riesgo. Por su parte, el pez mosquito *Gambusia affinis*, también fue considerado con un umbral de alto riesgo al poseer un valor de invasividad de 22.5 (Tabla 20)

Tabla 20. Puntuación y niveles de riesgo para las diferentes especies exóticas ubicadas en la cuenca baja del río Santo Domingo, Baja California, México.

Especies	Nombre común	Puntuación	UK (1;19)	Japan (1;19.8)	UD (1;24)
<i>Lepomis cyanellus</i>	Mojarra verde	27	Alto	Alto	Alto
<i>Gambusia affinis</i>	Pez mosquito	22.5	Alto	Alto	Medio

8.3 Modelo FPEIR

A continuación, en la tabla 21, se presenta el modelo FPEIR construido en esta investigación con base en los indicadores de fuerzas motrices, presión, estado, impacto y respuesta analizados en el área de estudio.

Tabla 21. Modelo de fuerzas Motrices-Presión-Estado-Impacto-Respuesta de la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México. Elaboración propia.

Criterios	Fuerzas motrices (causas)	Presión	Estado	Impacto	Respuesta
Diversidad de especies de peces	Introducción de especies exóticas a consecuencia de la piscicultura rural u ornato (<i>Gambusia affinis</i> y <i>Lepomis cyanellus</i>).	Especies exóticas cuenca río abajo.	<i>O. m. nelsoni</i> se encuentra actualmente en protección especial por la NOM-059 debido a su distribución confinada y su abundancia que ha estado amenazada en los últimos 30 años. El estatus actual de conservación de la trucha arcoíris de la sierra San Pedro Mártir (<i>O. m. nelsoni</i>) es considerado como estable.	Estas especies exóticas aun no llegan a los cuerpos de agua donde hábitat la trucha <i>O. m. nelsoni</i> , pero cuando lleguen posiblemente habrá competencia por el hábitat, provocando declive poblacional de la subespecie de trucha endémica.	Programa de conservación y manejo Parque Nacional sierra San Pedro Mártir, sin embargo esta subespecie endémica es considerada como introducida en dicho documento.
Naturales	Cambio climático	Variación más extrema de las temperaturas en los arroyos donde habita <i>O. m. nelsoni</i> .	Se registraron temperaturas letales del agua ≥ 28 °C en el sitio de estudio con la elevación más baja (arroyo San Antonio de Murillos, 553 msnm) con un acumulado de 365 h entre junio y septiembre de 2014, y una	Esta trucha expuesta a temperaturas superiores a este umbral (≥ 28 °C) experimenta estrés celular fisiológico, incluida la síntesis de proteínas de choque térmico (HSP) 30 y 70 (Lund et al., 2002, Meza-Matty et	Ninguna

			temperatura máxima registrada de 30.66 °C, por lo cual, fue considerado como el sitio más vulnerable al cambio climático. Una comparación de las temperaturas registradas en la Grulla durante dos periodos (1999-2000 y 2015-2019) muestra un mayor intervalo de variación entre las temperaturas más bajas y más altas de los últimos años, es decir, una mayor diferencia en las temperaturas promedio diarias registradas para las diferentes estaciones del año.	al., 2021), pudiendo provocar la muerte. Mayor variación de temperaturas en menor tiempo a lo de años anteriores podría provocar una menor adaptabilidad de esta subespecie y sus hábitats frente a estos cambios. Posible adaptación de especies exóticas durante el transcurso de los años futuros.	
	Calentamiento global	Tiempo de sequía con mayor duración.	Incendios en temporada de menor o nula precipitación.	Fuerte declive en la abundancia poblacional de esta trucha por el efecto erosivo de las cenizas en el aparato branquial de estos peces (Ruiz-Campos, 2017). Reducción o aclaramiento en la cobertura de la vegetación que provee de sombra y hojarasca al lecho del arroyo, ocasionando un incremento de la temperatura del agua por mayor incidencia de los rayos solares.	Programa de conservación y manejo Parque Nacional sierra San Pedro Mártir, considerado en la sección: Componente prevención y control de incendios y contingencias ambientales.
Demografía	Agricultura	Desviación del flujo del caudal para irrigación agrícola.	Extracción superior a la cantidad de agua obtenida de recargas producidas por año, por consecuencia de red de tuberías y repesos, llevando a un uso insostenible del recurso.	Sobreexplotación del agua de los arroyos y por consecuencia, disminución de calidad de los hábitats donde habita <i>O. m. nelsoni</i> , provocando disminución de sus poblaciones y de otras	Programa de conservación y manejo Parque Nacional sierra San Pedro Mártir, considerado en la

				especies, tanto de fauna como de flora tanto acuática como ribereña.	sección: Componente conservación de agua y suelos
	Ganadería	Sobrepastoreo	Evidencias de pisoteo por parte del ganado a los alrededores y dentro del cuerpo de agua.	Compactación de suelo, provocando desvíos del flujo del arroyo y modificación de los hábitats.	Programa de conservación y manejo Parque Nacional sierra San Pedro Mártir, considerado en la sección: Componente actividades productivas alternativas y tradicionales.
			Crecimiento de microalgas (cianofíceas) por aumento de materia orgánica producto de las heces del ganado, ocasionando eutrofización en las pozas del sitio La Grulla.	Incremento de materia orgánica en el arroyo La Grulla ocasionado por heces fecales, provocando crecimiento de microalgas cianofíceas por eutrofización, lo cual podría llegar a ser perjudicial para las truchas, provocando condiciones anóxicas y consecuentemente la muerte de las mismas.	Programa de conservación y manejo Parque Nacional sierra San Pedro Mártir, considerado en la sección: Componente actividades productivas alternativas y tradicionales.
	Pesca	Capturas clandestinas promovidas por ranchos ecoturísticas o pescadores furtivos.	No se observó una notable disminución de las poblaciones de <i>O. m. nelsoni</i> actualmente.	Extracción no regulada de ejemplares de <i>O. m. nelsoni</i> , utilizando artes de pesca no apropiadas para la captura de una especie que está protegida. Continuando esta actividad a futuro ocasionará disminución población de esta subespecie.	Ninguna

8.4 Propuesta de conservación y manejo integral

8.4.1 Mapas con el índice EstPre

A continuación, a partir del resultado del índice EstPre, fueron elaboradas las figuras 66-68 con el fin de determinar cuáles serían los sitios prioritarios para llevar a cabo las acciones de manejo. Dicho índice fue dividido en tres categorías a partir de los indicadores de presión y estado. Un valor alto de prioridad indica un mayor grado de amenaza y alto valor de vulnerabilidad, definiendo así, que el índice PreEst es la combinación de vulnerabilidad/amenaza, por tanto, a mayor valor del índice mayor prioridad. La vulnerabilidad está definida por el Estado y las amenazas por Fuerzas Motrices, Presiones e Impacto. La localidad San Antonio de Murillos (localidad tipo) fue situada en la clasificación de prioridad “Alta”, como prioridad “Media” se identificó la localidad El Potrero. Por último, la clasificación “Baja” correspondió a la localidad La Grulla (Tabla 22).

Tabla 22. Unidades correspondientes a la clasificación de prioridad obtenida por el índice EstPre, durante el periodo 2014-2019 en las localidades de estudio de la cuenca del río Santo Domingo, Ensenada, Baja California, México.

Prioridad	Unidades
Alta	San Antonio de Murillos (Localidad tipo)
Media	El Potrero
Baja	La Grulla



Figura 66. Clasificación del Índice EstPre en el sitio de San Antonio de Murillos, localizado en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.

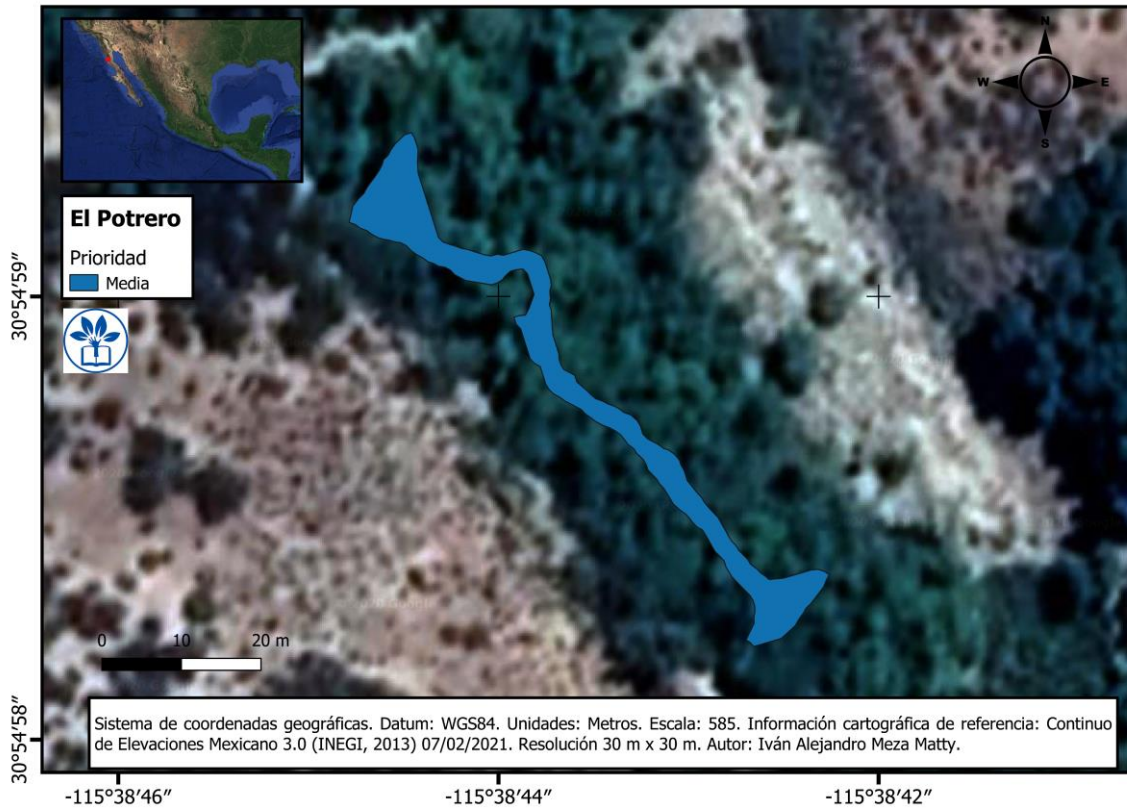


Figura 67. Clasificación del Índice EstPre en el sitio de El Potrero, localizado en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.

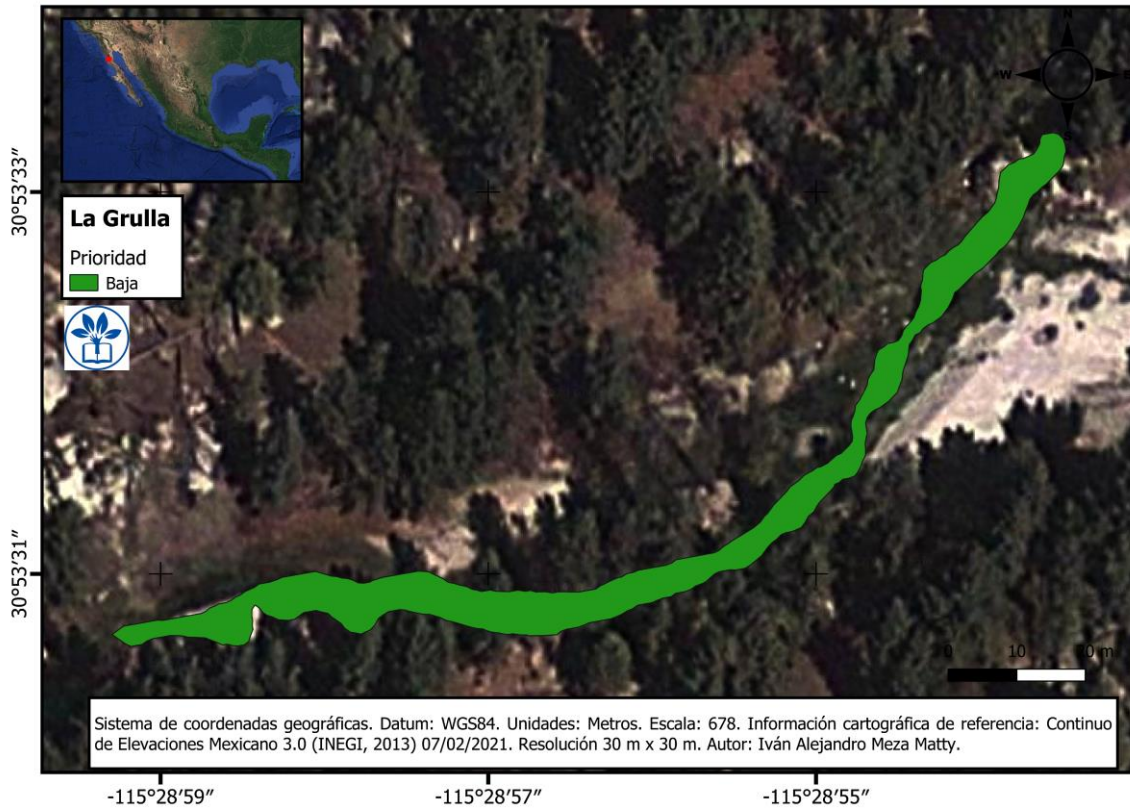


Figura 68. Clasificación del Índice EstPre en el sitio de La Grulla, localizado en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México.

8.4.2 Actores potenciales

Para la aplicación de las propuestas de manejo para el pez endémico *Oncorhynchus mykiss nelsoni* y sus diferentes hábitats en la cuenca del río Santo Domingo, se procedió a la identificación de los actores potenciales, los cuales van desde agencias intergubernamentales, sector privado, organizaciones sociales, instituciones de la comunidad científica, hasta los habitantes de la cuenca del río Santo Domingo. El alcance de éstas propuestas tendrá impacto en el ámbito local, regional, nacional e internacional, principalmente en la importancia para la conservación de estos sitios (Tabla 23).

Tabla 23. Actores potenciales identificados para la realización de la propuesta de manejo del pez endémico *O. m. nelsoni* en la cuenca del río Santo Domingo, Baja California, México. SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), INE (Instituto Nacional de Ecología), CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas), CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), UABC (Universidad Autónoma de Baja California), CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada), SIMAC (Sociedad Ictiológica Mexicana A.C.), UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México), AZFGD (Arizona Game and Fish Department), CDFG (California Department of Fish and Game), FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), IUCN (International Union for Conservation of Nature), WWF (World Wildlife Fund) y DFC (Desert Fishes Council).

Tipos de actores/Nivel de influencia	Local (Municipal)	Regional	Nacional	Internacional
Funcionarios públicos	Director de ecología municipal de Ensenada Presidente Municipal de Ensenada	Delegado de Ecología del Estado	N/A	N/A
Agencias de gobierno	Departamento de ecología municipal de Ensenada Gobierno Municipal de Ensenada	Dirección de ecología del Estado	SEMARNAT, INE, CONANP, CONABIO, CONAGUA	AZFGD, CDFG, FAO
Sector privado	Ranchos ecoturísticos	N/A	N/A	N/A
Comunidad científica	N/A	UABC, CICESE	UNAM, SIMAC	N/A
Organizaciones conservacionistas	N/A	N/A	Pronatura	IUCN, WWF, DFC
Actores menos organizados Propietarios de tierras	Habitantes de la cuenca del río Santo Domingo	N/A	N/A	N/A

8.4.3 FODA

Como complemento a las propuestas de manejo a nivel sistema se identificaron seis fortalezas, diez oportunidades, once debilidades y doce amenazas por medio de un análisis FODA, las cuales fueron colocadas en una matriz para la generación de recomendaciones (Tabla 24).

Tabla 24. Análisis FODA para las localidades de estudio en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Ensenada, Baja California, México.

	Fortalezas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas
1	Gran diversidad de especies de flora y fauna	Educación ambiental a los habitantes de la cuenca del río Santo Domingo y turistas	Introducción de especies exóticas	Pérdida de biodiversidad
2	<i>Oncorhynchus mykiss nelsoni</i> es una de solo tres formas endémicas de peces en las aguas continentales de la península de Baja California	Investigación científica	Susceptible a sufrir impactos por fenómenos naturales	Cambio climático
3	El estatus actual de conservación de la trucha arcoíris de la sierra San Pedro Mártir (<i>O. m. nelsoni</i>) puede ser considerado como estable, lo cual es consecuencia de lo remoto y poco accesible de los sitios de distribución	Turismo ecoturístico	Falta de recursos económicos	Deforestación
4	Esta trucha tiene una alta resiliencia ante fenómenos naturales como lo son los incendios	Apoyos económicos por parte del gobierno para control y erradicación de peces exóticas	No hay un plan de manejo de <i>O. m. nelsoni</i>	Ganadería

	o fuertes crecientes			
5	Las tres localidades de estudio son sitios remotos con escasa población cercana	Mayor interés en la importancia de las especies endémicas	Poca concientización de la población para la protección de especies endémicas	Desviación del flujo del caudal para irrigación agrícola
6	La población de trucha arcoíris perteneciente a la SSPM es considerada la subespecie más sureña de la especie, considerándose una unidad evolutiva discreta y diferenciada.	Proponer a las localidades San Antonio de Murillos (localidad tipo) y El Potrero como Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC)	No existen planes de manejo de desechos.	Acuicultura
7		Trabajos participativos por parte de la comunidad de la cuenca del río Santo Domingo	Alteración en los régimenes de flujo de los arroyos	Desconocimiento de la población acerca de los impactos de la introducción de especies exóticas
8		Determinación del caudal ecológico mínimo	Los hábitats donde vive esta trucha son considerados como ecosistemas frágiles al disturbio potencial por actividades antropogénicas	Disminución de la profundidad de los cuerpos de agua por azolve, ocasionado por fuerzas crecientes y compactación de suelo

9		Criopreservación	Capturas clandestinas por pescadores furtivos	Incendios en los bosques
10		Establecer un plan de conservación y manejo integral de los hábitats donde habita esta trucha	Truchas expuestas a temperaturas $\geq 28^{\circ}\text{C}$ experimentan estrés fisiológico celular que incluye la síntesis de proteínas de choque térmico (HSP) 30 y 70	Crecimiento demográfico
11			Solo una de las tres localidades de estudio (La Grulla) se encuentra dentro del Parque Nacional sierra San Pedro Mártir. Las otras dos (San Antonio de Murillos "localidad tipo" y El Potrero) se encuentran fuera del parque nacional.	Minería
12				Pesca ilegal

8.4.4 Estrategias de conservación

A continuación, con base en los resultados previos se presentan las propuestas de manejo a nivel localidad y a nivel sistema (Cuenca del río Santo Domingo), donde se menciona en cada caso los proyectos para resolver o minimizar los impactos, las actividades a realizar, actores potenciales, y priorización con la que se deben tratar los impactos para la protección de la trucha endémica *O. m. nelsoni* (Tabla 25 y 26).

Tabla 25. Propuestas de manejo para los impactos a nivel localidad en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Ensenada, Baja California, México.

Impacto	Proyecto	Actividad(es)	Responsable(s)	Priorización	Unidades a aplicar
Alteración en los regímenes de flujo de los arroyos	Determinación del caudal ecológico en la cuenca del río Santo Domingo	-Monitoreo de los flujos de los sitios de los arroyos La Grulla, El Potrero y San Antonio de Murillos, al menos 4 veces al año (1 vez por estación del año). -Llevar a cabo todas las indicaciones que establece la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (SE, 2012), la cual establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. -Prohibición de cualquier obra hidráulica (represos, presas, canales, etc.) en los cuerpos de agua donde se distribuye esta trucha, debido a que provocaría alteración de los regímenes de flujo y de temperatura, además, este tipo de obras provoca un cambio en el patrón de nutrientes que fluyen río abajo. -No permitir el funcionamiento de la red de tuberías encontrada en la cuenca del río Santo Domingo. Además de revisar si se cuenta con un permiso y el estudio del impacto por esta actividad, avalado por la Comisión Nacional del Agua.	CONANP, CONAGUA, UABC, CICESE	Alta	San Antonio de Murillos (localidad tipo), El Potrero y La Grulla
Declive poblacional de <i>O. m. nelsoni</i>	Localidades San Antonio de Murillos (localidad tipo) y El Potrero como Áreas	- Debido a que el sitio arroyo San Antonio de Murillos ubicado en el rancho San Antonio, es la localidad tipo de esta subespecie endémica, así como poseer una población actual estable, debe ser establecido como un Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC) y ser	INE, UABC, CICESE, SEMARNAT, SIMAC, IUCN	Alta	San Antonio de Murillos (localidad

	Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC)	propuesto como un área de resguardo o conservación del germoplasma de esta subespecie protegida por la NOM-059. Posteriormente a ello, deberá ser establecida como ADVC también la localidad El Potrero. Este proyecto es fundamental para la futura conservación de este taxón exclusivo, debido a que estas localidades antes citadas se encuentran fuera de los límites territoriales del PNSSPM y están enfrentando una serie de amenazas antropogénicas que ponen en riesgo a las poblaciones de esta subespecie y sus hábitats.			tipo) y El Potrero
	Plan de acondicionamiento de los hábitats en la localidad San Antonio de Murillos ante el calentamiento global	-Debido a la amenaza del inminente cambio climático, el cual, de acuerdo a modelos climatológicos generados en esta investigación, se prevé un mayor número de eventos extremos por arriba de los ≥ 28 °C; por lo que es necesario el acondicionamiento de los hábitats mediante el uso ampliado de pozas profundas como refugios térmicos para estas truchas. -Reforestar con vegetación riparia nativa, con ello, se logrará una mayor cantidad de sombra en el espejo de agua, y, por tanto, creará un refugio termal para esta subespecie ante la no exposición directa con los rayos de sol.	UABC, CICESE, SEMARNAT, AZFGD, CDFG, IUCN, WWF, DFC	Alta	San Antonio de Murillos (localidad tipo)
	Sitios de translocación de la trucha cuenca arriba	-Debido a que es inminente el aumento de temperaturas en los próximos 30 años, viéndose amenazadas las poblaciones de trucha situadas en la localidad más sureña y de menor elevación (San Antonio de Murillos), es importante identificar nuevos sitios donde pueda subsistir esta subespecie endémica. Para ello, se tendrán que explorar y caracterizar nuevos sitios cuenca arriba (mayor altitud, menor temperatura), donde las temperaturas sean favorables en un futuro para esta trucha.	CONANP, SEMARNAT, UABC, CICESE, UNAM, WWF, SIMAC, CDFG	Alta	San Antonio de Murillos (localidad tipo), El Potrero y La Grulla

	-Hay una cantidad de arroyos de primer orden cuenca arriba donde no habita esta subespecie, pero podrían tener condiciones idóneas para el establecimiento de esta subespecie. -Se tienen registros históricos de translocaciones exitosas realizadas por el naturalista californiano Charles Edward entre los años 1929 y 1941 (Utt, 1991) quien trasplantó truchas procedentes de la localidad tipo (San Antonio de Murillos) a los arroyos La Grulla (años 1935 y 1936), La Misión o San Pedro (año 1929), La Zanja (0.5 millas abajo de la vereda Meling) (años 1935 y 1936), y Valladares (años 1937 y 1941). -Por lo cual, se capturará un número razonable de individuos de trucha endémica de las localidades San Antonio de Murillos y El Potrero, para ser translocadas a nuevos sitios de la misma cuenca del río Santo Domingo que cumplan con los requerimientos de hábitat de esta subespecie. -Los ejemplares capturados tendrán que ser transportados con las condiciones necesarias para su supervivencia durante el traslado al sitio de translocación. -Siendo la trucha <i>O. m. nelsoni</i> la única especie íctica en la parte alta de la cuenca del río Santo Domingo, no habría una competencia de hábitat con otro pez.			
Programa de concientización para evitar introducción de especies exóticas	-Socializar y divulgar un programa de concientización en la población que se encuentra en las inmediaciones de las localidades de estudio y alrededores, sobre el impacto que puede provocar la introducción de especies exóticas en las poblaciones de la trucha endémica y sus hábitats.	INE, UABC, CICESE, SIMAC, DFC	Alta	San Antonio de Murillos (localidad tipo), El

	-Prohibir cualquier tipo de introducción de especies de manera estricta, ya sean de otras especies ícticas u otra de carácter exótica a los ecosistemas acuáticos de la sierra San Pedro Mártir que potencialmente competirían por espacio y/o alimento con la trucha nativa. Tomando una mayor importancia en el caso de la introducción de especies congénéricas o conespecíficas, donde situaciones de exclusión competitiva, hibridación, pérdida de la diversidad genética y declive de las nativas son algunas de las consecuencias negativas de tales introducciones (Ruiz-Campos, 1993, 2017). -El desarrollo de cultivos de trucha arcoíris exótica (<i>O. mykiss irideus</i>) en sitios aledaños a los arroyos de distribución de la trucha arcoíris nativa (<i>O. m. nelsoni</i>) en la sierra San Pedro Mártir debe quedar totalmente prohibido en cualquiera de sus modalidades, incluso dentro del área natural protegida y en las áreas de influencia de esta misma sierra (Ruiz-Campos, 2017). -Identificar técnicas y herramientas adecuadas y eficientes para la extracción de las especies ícticas exóticas <i>Gambusia affinis</i> y <i>Lepomis cyanellus</i>, con la finalidad de evitar su propagación en un futuro en las localidades cuenca arriba donde se distribuye <i>O. m. nelsoni</i>. -Ajustar el protocolo de extracción y disposición a partir de los resultados obtenidos del programa implementado.			Potrero y La Grulla
Plan de pesca sustentable de la trucha <i>O. m. nelsoni</i>	A pesar de que la trucha <i>O. m. nelsoni</i> está considerada en la NOM-059-ECOL-2010 como especie en protección especial, se realizan capturas clandestinas por pescadores furtivos, o bien, promovidas por ranchos dedicados a las actividades de ecoturismo en la sierra San Pedro Mártir. La	Ranchos ecoturísticos, SEMARNAT, UABC, CICESE	Media	San Antonio de Murillos (localidad tipo), El

		falta de vigilancia y presencia de las autoridades competentes en esta área facilita este tipo de actividad ilícita. -Elaborar un plan de pesca sustentable de trucha nativa, donde se realice una pesca deportiva regularizada. Esta subespecie, al ser una especie protegida, se requiere estrictamente el otorgamiento de un permiso especial de captura por la SEMARNAT, en la modalidad de captura y liberación <i>in situ</i> en aquellos sitios autorizados para la pesca recreativa (p. ej., arroyo San Rafael). Esta práctica de captura y liberación <i>in situ</i> deberá ser únicamente mediante el método de caña y anzuelo, utilizando sólo anzuelos sin garfio para no lastimar la región bucal del ejemplar enganchado y reducir la posible mortalidad postcaptura. De manera estricta, se debe prohibir realizar actividades de pesca deportiva o recreativa durante la época de veda de esta trucha, misma que ocurre en la estación de invierno (diciembre-marzo) (Ruiz-Campos, 2017). -Desarrollar cultivos de esta trucha nativa con fines de repoblación sería una medida proactiva en sitios autorizados para la pesca recreativa (e.g., arroyo San Rafael).			Potrero y La Grulla
	Capacidad de carga ganadera para la conservación de la localidad La Grulla	-Para la conservación del ecosistema del arroyo y la pradera La Grulla, donde habitan gran cantidad de especie nativas de flora y fauna, algunas de ellas en la NOM-059, se debe evitar de manera estricta el pastoreo por el ganado para el mantenimiento de las condiciones de hábitat.	CONANP, UABC, CICESE, SEMARNAT	Baja	La Grulla
Asolvamiento en los cuerpos de agua y	Prohibición de caminos o brechas adyacentes a los	-Se deberá prohibir la construcción de caminos o brechas dentro o adyacente a los ambientes riparios, ya que esta práctica es una de las principales causantes de los procesos de erosión y/o sedimentación de los arroyos, alterando los	CONANP, SEMARNAT	Media	San Antonio de Murillos (localidad

remoción de la vegetación	cuerpos de agua donde habita esta trucha	requerimientos y calidad de hábitat (flujo y cobertura) de la trucha (Marcus et al., 1990).			tipo), El Potrero y La Grulla
	Plan de desazolvamiento periódico	-Debido a la presencia de fenómenos naturales como tormentas intensas, principalmente en la estación de invierno, ocasionan fuertes crecientes, o incendios forestales a lo largo de la cuenca, principalmente en épocas de sequía, pueden ocasionar la introducción de una gran cantidad de sedimento a estos arroyos, cambiando considerablemente los hábitats, disminuyendo su profundidad principalmente, lo cual provoca que las truchas tengan una mayor incidencia a los rayos solares, pudiendo provocar una tasa de mortalidad más alta por temperaturas extremas, especialmente, en la localidad San Antonio de Murillos (sitio con temperaturas ≥ 28 °C). -Por otro lado, las actividades antropogénicas también han ocasionado cambios en los hábitats, como lo es el tránsito del ganado en los cuerpos de agua en la localidad La Grulla, provocando compactación del suelo, provocando en algunos sitios la disminución o el nulo paso del agua, debido a que algunos sitios son muy someros, impidiendo con ello, el transporte eficiente de nutrientes y hasta de las mismas truchas. -Para resolver esto, será necesario desazolvar periódicamente estos sitios, garantizando la supervivencia de esta subespecie y la conservación de estos hábitats.	SEMARNAT, UABC, CICESE, WWF	Media	San Antonio de Murillos (localidad tipo), El Potrero y La Grulla
	Nuevas rutas de tránsito del ganado en la	-Actualmente se practica la actividad ganadera en la ciénaga La Grulla, conllevando a una serie de afectaciones en los hábitats riparios y acuáticos. Entre ellas, destacan la remoción de la vegetación de los bancos y la alteración de	CONANP, SEMARNAT, UABC, CICESE	Baja	La Grulla

	localidad La Grulla la morfología del arroyo por la actividad del ganado, lo cual promueve asolvamiento del arroyo e incremento en la temperatura del agua, en ambos casos disminuyendo la calidad de hábitat para la trucha (Zoellick y Cade, 2006). -Esta actividad ha sido fomentada por los ganaderos locales desde hace más de un siglo, estando el ganado presente en las zonas de pradera del PNSSPM durante los meses de primavera, verano y parte de otoño. Así, el pisoteo del terreno por el ganado provoca compactación del suelo y promueve en el sitio del arroyo la erosión de los bancos del canal. -Otra consecuencia de la actividad del ganado es el aumento en la cantidad de bacterias coliformes en el cuerpo de agua debido a las heces fecales que son arrastradas por los escurrimientos pluviales. Por lo cual, se tendrán que evitar el uso de las praderas del parque nacional para fines de ganadería. -Cercar los cuerpos de agua donde se distribuye la trucha endémica, con la finalidad, de proteger los hábitats donde vive esta subespecie.				
Contaminación del agua de los arroyos	Manejo de desechos orgánicos de ganadería	-Como resultado de la actividad ganadera, en la localidad La Grulla, se encontró evidencia de heces en los arroyos, así como vacas y caballos muertos a las orillas de los cuerpos de agua, provocando problemas de eutrofización en los arroyos. -Será necesario una capacitación a los rancheros sobre el manejo y sitios posibles donde puedan desecharse estos	CONANP, SEMARNAT, UABC, CICESE	Baja	La Grulla

		residuos orgánicos y con ello, no afectar las condiciones de los arroyos. -En caso omiso a esta estrategia, llevar a cabo multas económicas a los responsables, o la prohibición de esta actividad al ser una parque nacional.			
	Campaña para no utilizar fertilizantes químicos en los ranchos aledaños a los arroyos	-A pesar de no haber obtenido registros de fertilizantes en los análisis de agua en este estudio, es importante la prohibición de fertilizantes químicos en los ranchos aledaños. -Por ello, deberán realizarse pláticas a los rancheros sobre el impacto que ocasionan los fertilizantes en cuerpos de agua.	SEMARNAT, UABC, CICESE	Baja	San Antonio de Murillos (localidad tipo) y El Potrero

Tabla 26. Propuestas de manejo para los impactos a nivel sistema en la cuenca del río Santo Domingo, sierra San Pedro Mártir, Ensenada, Baja California, México.

Debilidades, oportunidades o amenazas y componentes asociados del análisis FODA	Proyecto	Actividad(es)	Responsable(s)
F2, F5, O1, O2, O5, O6, O7, O8, O10, D2, D3, D4, D5, D7, D8, D10, D11, A1, A2, A5, A6, A8, A10 y A11	Determinación del caudal ecológico en la cuenca del río Santo Domingo	Debido a las diferentes amenazas encontradas en este estudio, se recomienda tomar en cuenta a corto plazo este proyecto, proponiendo las siguientes actividades: -Llevar a cabo todas las indicaciones que establece la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (SE, 2012), la cual establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. -Monitoreo de los flujos en todos los sitios donde se ha detectado la presencia de <i>O. m. nelsoni</i> (La Grulla, El Potrero, La Zanja, San Antonio y San Antonio de Murillos) 4 veces al año (1 vez por estación del año) en la cuenca del río Santo Domingo, con el fin de poder determinar la cantidad de recarga anual, especialmente en años con sequías. -Prohibir y detener el funcionamiento de cualquier obra hidráulica (represos, presas, canales, etc.) en los cuerpos de agua donde se distribuye esta trucha, hasta que se define la cantidad de agua que podría extraerse si lo dictamina el resultado del proyecto, debido a que provocaría alteración de los regímenes de flujo y de temperatura (mayor exposición a los rayos solares para las truchas debido a una menor profundidad), además, este tipo de obras provoca un cambio en el patrón de nutrientes que fluyen río abajo.	CONANP, CONAGUA, UABC, CICESE

		-No permitir el funcionamiento de la red de tuberías encontrada en las inmediaciones de las localidades de Valladares y San Antonio de Murillos, hasta saber el resultado y dictamen de este proyecto.	
F2, F3, F5, F6, O1, O2, O4, O5, O7, O10, D1, D2, D3, D4, D5, D8, D9, D11, A1, A2, A6, D7, D10 Y D12	Programa de concientización sobre especies exóticas en la cuenca Santo Domingo	Históricamente el impacto provocado por especies exóticas en sitios donde se han introducido han provocado la disminución o extirpación de gran cantidad de especies endémicas y nativas a lo largo planeta, por lo cual es de vital importancia, llevar a cabo este programa a lo largo de toda la cuenca Santo Domingo, tanto en los sitios donde se han identificado ya especies exóticas como en lo que aún no han llegado o no se han adaptado a las condiciones del lugar. Es importante explicarles a los habitantes del lugar que impactos puede provocar una especie introducida, ya sea para uso ornamental, acuícola, etc. Por tanto, deberán llevarse a cabo las siguientes actividades: -Socializar y divulgar un programa de concientización en la población que se encuentra en las inmediaciones de las localidades de estudio y alrededores, sobre el impacto que puede provocar la introducción de especies exóticas en las poblaciones de la trucha endémica y sus hábitats. -Prohibir cualquier tipo de introducción de especies de manera estricta, ya sean de otras especies ícticas u otra de carácter exótica a los ecosistemas acuáticos de la sierra San Pedro Mártir que potencialmente competirían por espacio y/o alimento con la trucha nativa. Tomando una mayor importancia en el caso de la introducción de especies congénicas o conespecíficas, donde situaciones de exclusión competitiva, hibridación, pérdida de la diversidad genética y declive de las nativas son algunas de las consecuencias negativas de tales introducciones. -El desarrollo de cultivos de trucha arcoíris exótica (<i>O. mykiss irideus</i>) en sitios aledaños a los arroyos de distribución de la trucha arcoíris nativa (<i>O. m. nelsoni</i>) en la sierra San Pedro Mártir debe quedar totalmente prohibido en cualquiera de sus modalidades, incluso dentro del área natural protegida y en las áreas de influencia de esta misma sierra (Ruiz-Campos, 2017).	Dirección de ecología del Estado, UABC, CICESE, SIMAC, INE

		-Identificar técnicas y herramientas adecuadas y eficientes para la extracción de las especies ícticas exóticas <i>Gambusia affinis</i> y <i>Lepomis cyanellus</i>, con la finalidad de evitar su propagación en un futuro en las localidades cuenca arriba donde se distribuye <i>O. m. nelsoni</i>. -Ajustar el protocolo de extracción y disposición a partir de los resultados obtenidos del programa implementado.	
F2, F6, O2, O4, O5, O6, O7, O9, O10, D3, D4, D5, D11, A1, A2, A6, A7, A10, A12	Propuesta para cambiar la categoría de riesgo de protección especial a amenazada a la trucha <i>O. m. nelsoni</i> en la NOM-059	A pesar de que el estatus actual de conservación de la trucha arcoíris de la sierra San Pedro Mártir (<i>O. m. nelsoni</i>) es estable, sus ecosistemas son frágiles ante el disturbio potencial por todas las actividades antropogénicas que lo están amenazando. -Por lo cual, se recomienda iniciar el proceso de cambio de categoría en la NOM-059 de la trucha endémica de protección especial a especie amenazada, con el fin, de tener una mayor protección dicha subespecie y sus hábitats ante las amenazas presentes. Hay suficiente información generada para esta trucha que permite atender cada uno de los requisitos que se necesitan para proponer este cambio de categoría.	UABC, CICESE, SEMARNAT
F1, F2, F3, O1, O2, O4, O7, O8, O10, D2, D3, D4, D5, D7, D8, D11, A1, A3, A4, A5, A7, A9, A10 y A11	Prohibición de caminos o brechas en los arroyos de la cuenca	-Debe prohibirse la construcción de caminos o brechas dentro o adyacente a los ambientes riparios, ya que esta práctica es una de las principales causantes de los procesos de erosión y/o sedimentación de los arroyos, alterando los requerimientos y calidad de hábitat (flujo y cobertura) de la trucha (Marcus et al., 1990). -Una opción viable sería la construcción peatonal de puentes sustentables, que no dañen el medio ambiente con el paso de los años, ejemplo, sin materiales contaminables para estos ecosistemas. -En caso de construcción de puentes para vehículos, deberán construirse de una forma que no impida el flujo de agua y sustrato de los arroyos.	Departamento de ecología municipal de Ensenada, Gobierno Municipal de Ensenada, SEMARNAT, UABC, CICESE, WWF

F1, F2, F4, F6, O1, O2, O4, O5, O7, O10, D2, D3, D4, D5, D6, D8 y D11	Plan de asolvamiento de los arroyos	-La presencia de fenómenos naturales como tormentas intensas, principalmente en la estación de invierno, han provocado fuertes crecientes. Así mismo los incendios forestales a lo largo de los años en la cuenca, principalmente en épocas de sequía, han provocado la introducción de una gran cantidad de sedimento a estos arroyos, cambiando considerablemente la morfología y profundidad de los mismos, provocando mayor exposición de los rayos solares y la probabilidad de incrementar el efecto de las temperaturas críticas para las truchas y otras especies que habitan estos sitios. -Para resolver esto, es necesario azolvar periódicamente los arroyos, garantizando una calidad alta de estos ecosistemas.	Departamento de ecología municipal de Ensenada, Gobierno Municipal de Ensenada, SEMARNAT, UABC, CICESE, WWF
F1, F2, F4, F5, O1, O2, O4, O10, D3, D4, D5, D6, D8, D11, A1, A5, A7 A10	Prohibición de fertilizantes químicos por agricultura	-A pesar de no haber obtenido registros de fertilizantes en los análisis de agua en las localidades de estudio, es importante la prohibición de fertilizantes químicos a lo largo de la cuenca, debido a que hay ranchos en la parte baja y media de la misma donde se siembran distintas especies vegetales. Por lo cual es de suma importancia, llevar a cabo un programa de divulgación del impacto provocado a los ecosistemas por el uso de fertilizantes químicos, así como también, estrategias para llevar a cabo una eficiente productividad mediante el cultivo sustentable, como por ejemplo, el uso de fertilizantes orgánicos.	Ranchos ecoturísticos, INE, SEMARNAT, UABC, CICESE

9. Discusión

9.1 Estado de conservación de la trucha endémica *Oncorhynchus mykiss nelsoni* y sus hábitats.

9.1.1 Temperatura de agua de los sitios de estudio

A pesar de que varios estudios han proyectado los efectos del aumento de las temperaturas en la distribución de los salmónidos considerando un amplio dominio geográfico (Nakano et al., 1996; Flebbe et al., 2006; Rieman et al., 2007), nuestro estudio se realizó en un escala regional en la vertiente occidental de la sierra San Pedro Mártir (noroeste de México) para predecir los efectos de los aumentos de temperatura (0.45 a 2.0 °C) sobre la distribución altitudinal de la subespecie de trucha arcoíris más austral (*O. m. nelsoni*), durante los años 2025 y 2050.

La temperatura del agua ≥ 28 °C que se considera como letal para las truchas arcoíris del sur de Norteamérica (Matthews y Berg, 1997; Kammerer y Heppell, 2013b; Nusslé et al., 2015) se registró en nuestra región de estudio en el Arroyo San Antonio de Murillos, en las inmediaciones del Rancho San Antonio (553-560 msnm), donde la trucha endémica alcanza su límite más bajo de distribución altitudinal (Ruiz-Campos, 2017). En este sitio, se registró un total de 365 horas con temperaturas ≥ 28 °C entre el 1 de junio de 2014 y el 26 de septiembre de 2014. Estas temperaturas mayores a 28 °C superaron significativamente la duración e intensidad de aquellas consideradas como propicias para la supervivencia de la trucha nativa en los arroyos del sur de California, EE.UU. (Nusslé et al., 2015).

Con base en los valores discutidos anteriormente, el sitio de muestreo en el Arroyo San Antonio de Murillos representa la ubicación más vulnerable al calentamiento global y, por tanto, la que con mayor probabilidad generaría un desplazamiento en la distribución altitudinal de *O. m. nelsoni* hacia hábitats más fríos cuenca arriba (ver Rieman et al., 2007). Los peces expuestos a temperaturas superiores de 28 °C experimentan estrés celular fisiológico, incluida la síntesis de proteínas de choque térmico (HSP) 30 y 70 (Lund et al., 2002), y los niveles de esta última aumentan

durante la exposición térmica aguda (Mesa et al., 2002), lo cual inhabilitaría a las truchas a ocupar estos sitios térmicamente modificados.

Comparaciones de las temperaturas del agua en el sitio de estudio con mayor elevación (Arroyo La Grulla, 2,030 msnm) entre junio de 1999 y mayo de 2000, y entre agosto de 2015 y abril de 2019, revelaron una mayor variabilidad estacional en los intervalos de temperatura promedio diarios, especialmente en las temporadas de verano del segundo periodo. Esto representa una amenaza latente no solo para la trucha endémica, sino también para otras especies acuáticas y terrestres que habitan este ecosistema montañoso, coincidiendo así con los efectos del calentamiento global proyectados por el IPCC. Cabe señalar que se utilizó la misma metodología de medición para los dos periodos de estudio antes mencionados.

Varios escenarios de cambio climático predicen un aumento en la temperatura del agua, lo que para la trucha arcoíris conducirá a un mayor costo energético si las corrientes fluviales más cálidas no producen suficientes recursos alimenticios para satisfacer sus demandas metabólicas, lo que conducirá a niveles reducidos de crecimiento en los individuos (Battin et al., 2007). Este aumento de temperatura producirá cambios en la distribución latitudinal y altitudinal de las poblaciones de salmónidos, lo que afectará su capacidad para resistir tormentas tropicales, especialmente en verano (Battin et al., 2007). Además, es probable que las temperaturas de verano alcancen o superen los niveles tolerados por las truchas, provocando tasas de mortalidad más altas (Crozier et al., 2008) y, por tanto, permitiendo que especies que no sean salmónidos, incluidos posibles depredadores o competidores, prosperen en estos hábitats térmicamente modificados (Reeves et al., 1987).

En el presente estudio se evidenció que un aumento en la temperatura promedio del agua entre 0.45 y 2.0 °C, durante las horas diurnas de verano en la localidad tipo de *O. m. nelsoni* (Arroyo San Antonio de Murillos) ubicada a 553 msnm, puede aumentar la amplitud y duración del ámbito de temperatura letal para esta subespecie (Meza-Matty et al., 2021), como ocurre en las poblaciones de trucha arcoíris del sur de California, EE. UU., a temperaturas ≥ 28 °C (Nusslé et al., 2015).

Por tanto, estos cambios de temperatura generarían un confinamiento en el ámbito de distribución altitudinal de esta subespecie en los arroyos de la sierra San Pedro Mártir, permaneciendo en aquellas elevaciones donde el intervalo térmico es apropiado para su supervivencia.

9.1.2 Composición fisicoquímica del agua

9.1.2.1 Parámetros ambientales

Los valores de los parámetros fisicoquímicos determinados en los arroyos de distribución de la trucha endémica de San Pedro Mártir, fueron relativamente similares en un lapso de 30 años (Ruiz-Campos, 1993, 2017; presente estudio). El valor de temperatura más alto se registró en la localidad San Antonio de Murillos con 25.4 °C el día 26 de junio de 2019, mientras que valor máximo por Ruiz-Campos (2017) fue de 25.24 °C en la misma localidad el día 04 de abril de 2014; mientras que la temperatura más baja registrada en los muestreos de este estudio fue de 14.2 °C en la localidad La Grulla, el obtenido por Ruiz-Campos (2017) fue de 15.74 °C, registrada también en la Grulla. Estas diferencias entre máximas y mínimas temperaturas encontradas son debido al enfriamiento adiabático por efecto de la altitud a la que se encuentran las localidades estudiadas (San Antonio de Murillos, 553 msnm; y La Grulla, 2080 msnm). El oxígeno disuelto durante los muestreos de este estudio osciló entre los 6.8 mg/l (San Antonio de Murillos, junio 2019) y los 9.35 mg/l (El Potrero, mayo 2019), siendo relativamente más altos a los obtenidos por Ruiz-Campos (2017) 5.34 mg/l en abril de 2015 y 6.42 mg/l en mayo de 2014, ambos registrados en el arroyo San Antonio de Murillos. El potencial de hidrógeno (pH) en la cuenca del río Santo Domingo no mostró una variación significativa durante los muestreos actuales y aquellos que datan de 1987 a 2017 (Ruiz-Campos, 1993, 2017). El valor obtenido en el muestreo de esta investigación fue de 7.2 (“San Antonio de Murillos”, junio de 2019), mientras que los muestreos de Ruiz-Campos (2017) oscilaron entre 6.78 (La Grulla, abril de 2017) y 8.68 (La Grulla, septiembre de 2014) y los obtenidos por Ruiz-Campos (1993) con valores entre 7.9 (La Grulla,

agosto de 1990) y 8.4 (La Grulla, marzo de 1990). Por último, la conductividad fue ligeramente más alta durante los muestreos en esta investigación, oscilando entre los 4 mS/cm (San Antonio de Murillos, junio de 2019) y 4.2 mS/cm (El Potrero, mayo de 2019), mientras que Ruiz-Campos (2017) obtuvo valores entre 0.14 mS/cm (San Antonio de Murillos, abril de 2015) y 0.32 (San Antonio de Murillos, mayo de 2014). Dichos valores fisicoquímicos arriba referidos se mantienen dentro del intervalo óptimo y aceptable para la supervivencia de esta subespecie endémica (Ruiz-Campos et al., 2003); sin embargo, es importante llevar a cabo las estrategias de manejo planteadas en esta investigación para que las condiciones no se vuelvan adversas en un futuro, perjudicando las poblaciones de esta trucha y sus hábitats.

9.1.2.2 Parámetros químicos de agua

Basado en los resultados fisicoquímicos del agua obtenidos mediante los métodos gráficos Piper y Stiff para las localidades de estudio (La Grulla, El Potrero, San Antonio, La Zanja y San Antonio de Murillos) las composiciones hidrogeoquímicas dominantes en la localidad con mayor altitud (La Grulla, 2,080 msnm) son de tipo Ca-Na-HCO₃. En la localidad “El Potrero” se encontró una composición tipo Ca-Na-HCO₃-Cl. En las localidades con menor altitud (San Antonio, 585 msnm; La Zanja, 580 msnm; y San Antonio de Murillos, 553 msnm) se identificaron composiciones de tipo Ca-Na-HCO₃-Cl y Ca-Na-HCO₃. El primer tipo de agua identificada (Ca-Na-HCO₃) se considera como bicarbonatada cálcica, debido a que el calcio es el catión dominante en las aguas de los arroyos de la SSPM, el cual se deriva del drenaje de rocas ígneas (Ruiz-Campos, 2017). Mientras que el segundo tipo de agua identificada (Ca-Na-HCO₃-Cl) es considerada como Bicarbonatada Sódica. Ambos tipos corresponden a aguas con un menor grado de evolución (Padilla-Cámbara y García-Álvarez, 2012).

De acuerdo a los valores permisibles por la NOM-127-SSA1-1994, solo el nitrato excedió valores por arriba del límite establecido, debido posiblemente a residuos de

animales (Departamento de Servicios de Salud de California, 2006), ya que a las cercanías de estas aguas se encuentra el Rancho San Antonio de Murillos.

Por último, no se encontraron elementos en el agua que pudieran estar asociados a otras actividades antropogénicas, sin embargo, se recomienda tomar medidas a corto plazo sobre el manejo de las actividades antropogénicas en las áreas adyacentes a estos arroyos, tales como ganadería extensiva, agricultura, minería, etc.

9.1.3 Variación del caudal en la cuenca del río Santo Domingo

Zúñiga-Castillo (1995) reportó un escurrimiento medio anual de la cuenca del río Santo Domingo de 70 millones de m^3 , de acuerdo a los aforos de 27 años (1960-1987), registrados por la Comisión Nacional del Agua en la estación hidrométrica número 6 “Vicente Guerrero”. Cabe mencionar que el flujo anual promedio de este arroyo durante años secos, entre 1950 y 1977, no superó los 10 millones de $m^3/año$, pero entre 1978 y 1985, éste se incrementó a 180 millones de $m^3 /año$ (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1983).

Este análisis se dividió en dos categorías, la Estación Lluvias, comprendido en los meses de octubre a marzo, y la Estación Secas, abarcando los meses de abril a septiembre, ya que este sitio posee un clima subhúmedo, con precipitación principalmente invernal (Álvarez y Maisterrena, 1977). Cabe señalar que el caudal en un arroyo fluctúa dependiendo de la estación climática ya sea lluviosa o no lluviosa, por ello, comparamos periodos históricos y actuales de la misma estación para poder obtener un análisis fiable.

En la localidad La Grulla, donde se ubica un arroyo de primer orden, durante este análisis en la estación Secas (abril-septiembre) se encontró una disminución del caudal de $0.14 m^3/s$ entre agosto y septiembre 1990, mientras que de septiembre 2014 a agosto 2015 el caudal disminuyó a $0.05 m^3/s$. Posteriormente, hubo un ligero

aumento del caudal con el transcurso de los años, a 0.07 m³/s (septiembre 2016), 0.08 m³/s (septiembre 2018) y 0.11 m³/s (abril 2019).

En la estación Lluvias (octubre-marzo) representado en marzo de 1990 y octubre de 1992, el caudal del arroyo fue igual, teniendo un valor de 0.1 m³/s, sin embargo, en abril de 2017 se registró un 40% de disminución del caudal (0.06 m³/s) como resultado de un año seco. Por último, en septiembre de 2018 hubo un aumento del caudal, dando un valor de 0.09 m³/s. Sin embargo, estos ligeros aumentos en el caudal (estación Secas y estación Lluvias), podrían verse seriamente afectados en un futuro, debido a las diversas amenazas antropogénicas y naturales, principalmente al desvío del flujo del caudal cuenca arriba para irrigación agrícola en los ranchos que se encuentran a lo largo de la cuenca del río Santo Domingo (Ruiz-Campos, 2017).

En la localidad El Potrero no se pudo determinar el cambio en el caudal en ninguna de las dos estaciones ya que solo se tenía un registro histórico por estación, la estación Secas (marzo 1999 a septiembre 1999) y un registro en la estación Lluvias (noviembre 2019). Es importante continuar con las mediciones del caudal en las dos diferentes estaciones, con el fin de poder determinar la variabilidad que hay en el caudal de este arroyo.

En la localidad San Antonio de Murillos solo se obtuvieron mediciones de la estación Secas. Del primer periodo (1.63 m³/s, julio 1905) a los demás periodos analizados se encontró una notable disminución (0.113 m³/s, mayo 1936; 0.17 m³/s, mayo 1937; 0.16 m³/s, junio 1991; etc.), esta situación podría deberse a la demanda de agua por parte de los ranchos aledaños, que, conforme al paso de los años, han ido poblando esta cuenca. Cabe mencionar que continuó esta disminución del caudal hasta el último periodo evaluado (0.09 m³/s, junio 2019), Así mismo recordar que se observó y documentó en este estudio una red de tuberías en las inmediaciones de esta localidad tal y como lo había mencionado Ruiz-Campos (2017), situación que representa una seria amenaza para la distribución de trucha y sus hábitats, principalmente al ser la localidad tipo de esta subespecie endémica.

En lo que respecta al análisis retrospectivo mediante la toma fotografías históricas (Ruiz-Campos y Pister, 1995; Ruiz-Campos et al., 2014a; Ruiz-Campos, 2017) y actuales en el área de la poza que se forma en el sitio de desnivel del arroyo en la ciénaga La Grulla, se encontraron cambios significativos en su profundidad y fisiografía, tal y como se aprecia al comparar las fotografías históricas de septiembre de 1990, septiembre de 2014, agosto de 2015, septiembre de 2016 (Ruiz-Campos, 1993, 2017; Ruiz-Campos y Pister, 1995) y las tomadas en este estudio (septiembre 2018, noviembre 2018 y abril 2019). Por lo cual, es necesario el monitoreo del caudal de cada uno de los arroyos para determinar el caudal ecológico mínimo, así como continuar con el análisis retrospectivo de esta poza para observar si hay algún cambio positivo o continua la tendencia de ir disminuyendo la profundidad de este sitio.

9.1.4 Distribución y abundancia histórica y actual de la trucha *O. m. nelsoni*

La trucha de la sierra San Pedro Mártir ha experimentado declives poblacionales en su abundancia por efecto de eventos ambientales extremos como fuertes avenidas provocadas por fuertes lluvias, (Evermann, 1908; Nelson, 1921; Needham, 1938; Ruiz-Campos, 1993) y acarreo de cenizas a los arroyos derivados de incendios forestales (Ruiz-Campos, 2017).

Nelson (1921) describió una notable disminución en la abundancia poblacional de la trucha en el arroyo San Antonio de Murillos, ubicado a 560 msnm, a partir de una fuerte avenida que modificó la morfología del arroyo en el año 1904.

Años más tarde, Needham (1938) observó una fuerte disminución poblacional de truchas en el Arroyo San Antonio de Murillos, después de fuertes crecientes ocurridas en el invierno de 1936-1937.

En la parte noroeste de la sierra San Pedro Mártir, en las inmediaciones del Arroyo San Rafael (1,219 a 1,350 msnm), se registró un fuerte incendio forestal durante agosto de 1989 que aportó cenizas hacia los arroyos vía escorrentía por lluvias de

verano, lo cual provocó una alta mortalidad de las truchas debido a su efecto erosivo en sus branquias (Ruiz-Campos y Pister, 1995; Ruiz-Campos, 2017).

De acuerdo con muestreos ictiológicos por parte de Ruiz-Campos (2017) durante el periodo 1995-2015 en el arroyo San Antonio de Murillos, se encontró un descenso considerable en la densidad poblacional de la trucha de octubre de 1995 a enero de 2001, teniendo valores de 0.055 y 0.025 individuos/m² respectivamente, debido a variaciones interanuales en el flujo del arroyo que generaron modificaciones morfológicas de los hábitats del arroyo y una menor disponibilidad de pozas que son las unidades de hábitat preferidas por esta trucha (Ruiz-Campos, 2017). Posteriormente de enero de 2001 a mayo de 2014 continuó siendo baja la densidad (0.025 y 0.020 individuos/m², respectivamente), donde la menor densidad registrada en septiembre de 2010 fue consecuencia de fuertes avenidas durante el invierno, ocasionando azolvamiento de las pozas más profundas, reduciendo la disponibilidad de hábitat para esta subespecie (Ruiz-Campos, 2017). Fue hasta abril de 2015, donde la población exhibió un incremento a razón de 0.034 individuos/m².

En el Arroyo El Potrero a 950 msnm, donde se ubica el rancho El Potrero, Ruiz-Campos (2017) realizó dos muestreos (septiembre 1995 y enero 2001) que arrojaron densidades de 0.036 y 0.079 individuos/m², respectivamente. Más recientemente, en mayo de 2019, se registró una densidad de 0.090 individuos/m², un valor ligeramente mayor a los anteriores. Muestreos más recientes no fue posible realizarlos debido a las restricciones logísticas institucionales derivadas por la pandemia COVID-19.

Por último, en el Arroyo La Grulla, en el sitio de la pradera La Grulla, a 2,030 msnm, Ruiz-Campos (2017) realizó cuatro muestreos (septiembre 2014, agosto 2015), septiembre 2016 y abril, 2017). Del primer al segundo muestreo hubo un aumento considerable de más del 200% (0.024 a 0.052 individuos/m²). Sin embargo, entre el segundo y tercer muestreo la densidad tuvo una fuerte caída de más del 400%, (0.052 a 0.012 individuos/m²), por efecto de una notable disminución del flujo y una amplia cobertura del cauce por macrófitas acuáticas (Ruiz-Campos, 2017). Finalmente, en el cuarto muestreo, se mantuvo la misma densidad que el muestreo

anterior (0.012 individuos/m²). La mayor cobertura de macrófitas en el cauce del arroyo fue posiblemente resultado de los aportes de heces fecales del ganado vacuno que se utilizó como área de pastoreo la pradera adyacente (González-De La Barrera, 2021). Esta pradera adyacente es utilizada frecuentemente como sitio de pastoreo por el ganado vacuno durante los meses de primavera y verano, cuyas heces fecales son acarreadas por la escorrentía hacia el arroyo durante las lluvias de verano, aumentando así la cantidad de nutrientes en el agua y fomentando el crecimiento de macrófitas acuáticas sumergidas como *Potamogeton natans* (Ruiz-Campos, 2017), reduciendo la disponibilidad de hábitat para la trucha.

A pesar de que el estatus actual de conservación de la trucha arcoíris de la sierra San Pedro Mártir (*O. m. nelsoni*) puede ser considerado como estable, consecuencia de lo remoto y poco accesible de los sitios de distribución (Ruiz-Campos et al., 2014a, Ruiz-Campos, 2017). Estos sitios deben ser considerados como ecosistemas frágiles al disturbio potencial por todas las actividades antropogénicas y naturales que los están amenazando, donde se incluye la reducción del flujo por canalización o entubamiento para riego agrícola cuenca abajo, minería, ganadería en las praderas adyacentes a las cabeceras de los arroyos, aumento de la temperatura de los arroyos por cambio climático, e introducción de especies exóticas, entre otras.

9.1.5 Identificación de las unidades de hábitat (Evaluación del patrón de paisaje)

En este trabajo siete unidades de hábitat fueron identificadas bajo el sistema de tipificación para salmónidos de la USDA-USFS (1990) en los tres sitios analizados en la cuenca del río Santo Domingo, dicho sistema considera tres tipos de macrohábitat (poza, corriente y rápido), los cuales fueron encontrados en este estudio. De acuerdo a diversas investigaciones (Burner, 1951; Rantz, 1964; Smith, 1973; Ruiz-Campos, 1993; Ruiz-Campos, 2017), los peces salmónidos en arroyos tienen preferencia por hábitats con valores altos de descarga y velocidad de

corriente, cuyo resultado es la dispersión de los adultos reproductores, favoreciendo la búsqueda de sitios adecuados para el evento de desove. En este trabajo no se encontraron diferencias en los tipos de hábitats entre los sitios muestreados en los arroyos La Grulla y San Antonio de Murillos (Ruiz-Campos et al., 2021), sin embargo, las unidades de hábitat identificadas en cada una de las localidades pueden cambiar de un momento a otro, debido principalmente a fuertes crecientes durante la época de lluvias, cambiando considerablemente la morfología del arroyo y provocando alteraciones del hábitat (Evermann, 1908; Needham, 1938; Ruiz-Campos, 1993, 2017).

En este estudio se registró que en los muestreos de 2015 a 2019 en los arroyos de distribución de la trucha *O. m. nelsoni*, las mayores densidades de individuos correspondieron a aquellas unidades de hábitat de presencia rara (Poza de canal de confluencia (PCC), Poza en escalón (PES) y Poza de erosión lateral (PEL)), con poca o nula velocidad de corriente y de escasa superficie cubierta, características pertenecientes al macrohábitat de poza (Ruiz-Campos, 1993, 2017) el cual brinda una mayor disponibilidad de presas y un refugio térmico durante las temperaturas altas en el verano (Ruiz-Campos, 2017). Por sitio de muestreo, se encontró un porcentaje mayor (55%) de truchas en macrohábitat de poza en el arroyo San Antonio de Murillos en el muestreo de abril 2015 (Solís-Mendoza, 2016). En el arroyo El Potrero durante el muestreo de mayo 2019, se encontró el 76% de las truchas en macrohábitat de poza, siendo esta la localidad con la mayor diferencia entre densidad de truchas por macrohábitat (poza y corriente). Solo, en el sitio del arroyo La Grulla (Ruiz-Campos, 2017), se encontró la mayor cantidad de individuos (52%) en el macrohábitat de corriente. Éstas pozas son utilizadas posiblemente de modo temporal por las truchas como hábitat de refugios como lo indican otros autores (Burner, 1951; Rantz, 1964; Smith, 1973; Baltz et al., 1991).

9.1.5.1 Distribución espacial

Varios autores concuerdan que el origen de la subespecie endémica *Oncorhynchus mykiss nelsoni* de la SSPM fue resultado de un aislamiento de una población derivada de la trucha arcoíris costera (Behnke, 2002; Hubbs, 1946; Needham y Gard, 1959; Smith, 1984, 1991; Ruiz-Campos, 2017).

Con base en los muestreos que se han realizado en los diferentes sitios de arroyo en la vertiente occidental de la sierra San Pedro Mártir durante los últimos 30 años, la distribución de la trucha *O. m. nelsoni* es de tipo metapoblacional con poblaciones separadas entre las cuencas de los ríos San Rafael y Santo Domingo. En la cuenca del río Santo Domingo, las poblaciones están principalmente separadas durante la mayor parte del tiempo, pero se conectan durante eventos de crecientes extraordinarias provocadas lluvia o tormenta extrema.

Considerando el ámbito hogareño promedio de esta trucha (diámetro de 14.6 m o 60.2 m², Ruiz-Campos y Villalobos-Ramírez, 1991), se obtuvo el grupo principal poblacional en el sitio de San Antonio de Murillos, con un total de 264 m², el cual abarcó dos unidades de hábitat “COE y PEC” con una densidad poblacional de 0.0043 ind/m², formando un continente de dispersión (MacArthur y Wilson, 1967) debido a la cercanía y conexión entre ellos. En el sitio de La Grulla, se obtuvo un área total de 296 m² para el grupo principal poblacional y una densidad poblacional de 0.0126 ind/m². Finalmente, en el sitio de El Potrero, el grupo principal poblacional con un área de 31 m² estuvo dentro de una unidad de hábitat “PEL” con una densidad poblacional de 0.0206 ind/m².

9.1.5.2 Patrón del paisaje

En el patrón del paisaje de las localidades estudiadas en la cuenca del río Santo Domingo, se encontró un mosaico compuesto por parches de siete principales tipos de unidad de hábitat: PEC = Poza de erosión central, CFL = Corriente de flujo laminar, PES = Poza de escalón, COR = Corriente, PCC = Poza de canal de confluencia, PEL = Poza de erosión lateral, COE = Corriente escalonada. La matriz correspondió a la unidad de hábitat PEC, obteniendo la mayor cobertura espacial de acuerdo con la métrica CAP, mientras que las unidades de hábitat CFL, COR Y COE, se consideraron como corredores, ya que dichos hábitats son los encargados de vincular entre sí a los demás parches o coberturas en este estudio y proporcionar el mayor transporte de nutrientes gracias a poseer los más altos niveles de flujo de agua en los arroyos estudiados. Dichos parches se consideran de gran importancia debido a que protegen las conexiones, sustentan poblaciones viables, llevando una mayor cantidad de nutrientes dentro del ámbito hogareño o casero por de esta subespecie endémica (Ruiz-Campos y Villalobos-Ramírez, 1991).

Durante la evaluación de la conectividad y fragmentación dentro de los diferentes hábitats identificados en este estudio, se identificaron los procesos que permiten la presencia de la subespecie endémica de trucha en los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo. Las unidades de hábitat CFL, COR Y COE son conectores que facilitan el desplazamiento de especímenes de un sitio a otro en busca de alimento, refugio y nuevos lugares para reproducirse o colonizar.

Un atributo esencial para la conservación de una especie es la conectividad, debido a que mantiene la viabilidad de una dinámica metapoblacional, reduciendo el tamaño de las poblaciones para mantenerlas genéticamente viables y permitir la migración a otros sitios, aumentando la probabilidad de supervivencia (Acosta et al., 2003). Dicho escenario está presente en los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, ya que, durante las lluvias de invierno, en ocasiones llegan a producirse fuertes crecientes provocadas por lluvias torrenciales (Ruiz-Campos, 1993, 2017), conectando los arroyos estudiados en este estudio, pudiendo provocar un intercambio de organismos y colonizando nuevos sitios en caso de tener las

condiciones necesarias para la supervivencia de éstos. Durante la mayor parte del año, estos arroyos se encuentran desconectados aislando poblaciones, donde algunas desaparecen con el paso del tiempo, dependiendo de las condiciones que se presenten.

Para la obtención del grado de conexión de los arroyos de estudio a nivel espacial y estructural, no a nivel biológico o funcional se implementó la métrica ENN, evaluando los hábitats PEC, COR, PES y PEL, cuyos hábitats tuvieron dos o más parches en la zona de estudio, encontrando que el hábitat COR, fue la cobertura con mayor conexión, blindándole a la trucha *O. m. nelsoni* la facilidad de trasladarse de un parche a otro dentro de su ámbito de dispersión, debido a que no hay barreras físicas que impidan la dinámica poblacional dentro del cuerpo de agua (Kindlmann y Burel, 2008).

Por último, la fragmentación fue alta para la mayoría de los hábitats a excepción de las unidades de hábitat CFL (La Grulla), COE (San Antonio de Murillos) y PCC (El Potrero), ya que estas coberturas se encuentran solo en una localidad y solo se encontró un parche de cada una. A pesar de tener una fragmentación elevada la unidad de hábitat PEL, que fue la tercera cobertura con más parches (tres) y ocupando el quinto lugar de porción de área (8.77%), tiene una conectividad importante en el sistema, permitiendo que las poblaciones sean dinámicamente viables; indicando con ello, que el tamaño de los parches son pequeños y, por tanto, el riesgo de extinción de las poblaciones en este tipo de coberturas es más alto (Bennet, 2003).

9.2 Fuerzas Motrices, Presión, Impacto y Respuesta

9.2.1 Análisis documental

Para la identificación de Fuerzas Motrices, Presión, Impacto y Respuesta se realizó un análisis documental, descrito como una forma de investigación técnica, un conjunto de operaciones intelectuales, que describen o representan los documentos de manera unificada sistemática para facilitar su recuperación (Dulzaides-Iglesias y Molina-Gómez, 2004).

Dicho análisis recabó información relevante para este trabajo, donde se identificaron diversas actividades antropogénicas y naturales, las cuales están causando problemas en estos ecosistemas donde habita la trucha endémica *O. m. nelsoni*, describiendo los impactos o posibles impactos en estos hábitats de acuerdo a diversa literatura recabada durante esta investigación:

9.2.1.1 Fuerzas Motrices, Presión e Impacto

Ruiz-Campos (2017) identificó varias amenazas para la trucha endémica de la sierra San Pedro Mártir y sus hábitats, entre las cuales se encuentra la construcción de obras hidráulicas (represas, presas, canales de irrigación, etc.) que alteran los regímenes de flujo y de temperatura, así como también, cambian el patrón de nutrientes que fluye río abajo. Así mismo, señaló en concordancia con Marcus et. al. (1990) que la construcción de caminos o brechas causan erosión y/o sedimentación en arroyos, alterando las condiciones necesarias para tener una calidad de hábitat óptima (flujo y cobertura) para salmónidos.

Por otro lado, el pastoreo del ganado vacuno en la ciénaga La Grulla ha generado la compactación del suelo, promoviendo la erosión de los bancos del canal del arroyo. Otra consecuencia del efecto del pastoreo por ganado es la pérdida de vegetación de los bancos, lo cual genera una mayor erosión de los mismos y promueve el azolvamiento del canal del arroyo, aumento de temperatura del agua,

además de un aumento en la cantidad de bacterias coliformes en el agua debido a los aportes por heces fecales del ganado (Ruiz-Campos, 2017).

Aunado a lo anteriormente mencionado, un aumento de materia orgánica y nutrientes en los arroyos puede favorecer el crecimiento de microalgas (cianofíceas), ocasionando el fenómeno de eutrofización, provocando menor cantidad de oxígeno en el agua, lo cual es perjudicial para los salmónidos, provocando asfixia y posteriormente, la muerte (ProMED, 2016).

Otro factor que se considera una amenaza sobre la trucha de la sierra San Pedro Mártir es la captura clandestina por pescadores furtivos, o bien, promovidas por ranchos dedicados a las actividades de ecoturismo en la sierra San Pedro Mártir. Esta actividad es facilitada por la falta de vigilancia y poca presencia de las autoridades competentes en esta área (Ruiz-Campos, 2017).

En lo que concierne con la presencia de especies exóticas en las cuencas de los ríos Santo Domingo y San Rafael, dos especies exóticas ícticas han sido detectadas en la parte baja de ambas cuencas (*Gambusia affinis* y *Lepomis cyanellus*, Ruiz-Campos et al., 2014b), afortunadamente aún no hay registros en las localidades que están cuenca arriba donde se distribuye la trucha de San Pedro Mártir (Ruiz-Campos et. al., 2000, 2014a). Sin embargo, un aumento en la temperatura del agua podría propiciar la dispersión de esas especies exóticas cuenca arriba y ser una seria amenaza para la trucha endémica (Meza-Matty et. al., 2021).

Los posibles efectos de la distribución y abundancia de las truchas arcoíris en el sureste de Norteamérica por el incremento de la temperatura debido al Cambio Climático, subyace en que estos peces no pueden estar expuestos a temperaturas del agua por arriba de los 28 °C durante los meses de verano (Matthews y Berg, 1997), ya que temperaturas por arriba de este umbral térmico conducen a un estrés fisiológico celular que incluye la síntesis de proteínas de golpe calórico y consecuentemente la muerte (Lund et. al., 2002).

En este sentido, Matthews (2011) afirmó que las poblaciones de trucha dorada de California (*Oncorhynchus mykiss aguabonita*) están enfrentando la amenaza del

cambio climático, lo cual empeora la situación metapoblacional de esta trucha, combinada con la introgresión genética con trucha arcoíris exótica, la degradación del hábitat por pastoreo de ganado, entre otras amenazas.

De acuerdo a lo mencionado por Ruiz-Campos (1994) el ámbito térmico de la trucha *O. m. nelsoni* es de 4.7 °C (enero) a 24.5 °C (julio). Un aumento en la temperatura del agua a valores ≥ 28 °C podría ser crítico para esta subespecie de trucha nativa, misma que se encuentra en el umbral de tolerancia térmica de las truchas costeras de Norteamérica (Ruiz-Campos, 2017).

Finalmente, Meza-Matty et al. (2021) determinaron los escenarios climáticos para la trucha de San Pedro Mártir, encontrando que las temperaturas del agua previstas por hora debajo de 28 °C (no letales) podrían ocurrir en elevaciones mínimas de 868-898 msnm en 2025 y de 908-1028 msnm en 2050, reduciendo un 21-23% y un 23-31% su rango de distribución altitudinal actual, respectivamente, limitando así su presencia en la localidad tipo (San Antonio de Murillos).

9.2.1.2 Respuestas

La trucha endémica de San Pedro Mártir debido a su reducida distribución y abundancia, se encuentra actualmente considerada en la categoría de preocupación especial por el Comité de Peces en Peligro de Extinción de la American Fisheries Society (Jelks et al., 2008), así como en protección especial por el gobierno mexicano a través de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2010.

Por otro lado, esta subespecie es mencionada en la última actualización del programa de conservación y manejo del Parque Nacional sierra San Pedro Mártir, sin embargo, dado que la distribución histórica de la subespecie no incluía el área del Parque, para los fines de dicho programa, la consideran como una especie introducida (CONANP, 2009). Dentro de la sección “subprograma de manejo, componente actividades productivas alternativas y tradicionales, acciones a realizar”, se menciona el desarrollar esquemas productivos sustentables a largo

plazo para el aprovechamiento de la trucha endémica en la zona de confluencia. Cabe señalar que solo la localidad La Grulla está dentro del polígono del parque, por lo cual las localidades de El Potrero, Valladares y San Antonio de Murillos quedan excluidas de estas acciones, por tanto, se propone que el polígono del Parque Nacional se extienda hasta el rancho San Antonio, abarcando el arroyo y las zonas riparias.

9.2.2 Observaciones en campo

El 25 de junio de 2019 durante una salida de campo, en las inmediaciones de la localidad San Antonio de Murillos, se observó y fotografió una red de tuberías de varios kilómetros de longitud, sin alcanzar a observar cuál era el sitio inicial donde se podría extraer el agua, debido a que estaban delimitados ciertos terrenos pertenecientes a ranchos locales, comprobando que este tipo de obras hidráulicas, dejó de ser una posible amenaza (Ruiz-Campos, 2017) a una amenaza inminente para la subespecie endémica *O. m. nelsoni* y sus hábitats. Cabe mencionar que no se encuentra todavía en funcionamiento, sin embargo, representa una seria amenaza para los arroyos que conforman la cuenca del río Santo Domingo, debido a que una extracción superior al valor de recarga anual en estos sitios, provocará una disminución del flujo base y posiblemente la desaparición de unidades de hábitat de pozas, ocasionando alteraciones de la biodiversidad (acuática y riparia), así como disminución o alteración en los regímenes de flujo de nutrientes arroyo abajo, y un incremento en la temperatura de los arroyos. No solo la subespecie endémica *O. m. nelsoni* se vería afectada, Ruiz-Campos (2017) afirma que al menos una especie más de vertebrado acuático en peligro de extinción, *Entosphenus tridentata* (lamprea del Pacífico) se encuentra en estos sitios, además de otras dos especies con problemas de conservación, como: *Rana draytonii* y *Emys pallida*, las cuales están en la Norma Oficial Mexicana 059-2010.

Para cualquier obra hidráulica que se requiera realizar en los arroyos de la sierra San Pedro Mártir, es necesario contar con un estudio previo sobre el caudal ecológico mínimo a nivel de cuenca, con el propósito de determinar cuánta agua

puede extraerse del sitio analizado, sin afectar la recarga y mantener la conectividad de flujo epicontinental. En el caso de que se obtenga un valor mayor de caudal al valor ecológico mínimo necesario para mantener la conexión de los ecosistemas acuáticos y riparios, se podrá permitir la extracción de la cantidad excedente. De otra manera si el caudal obtenido en el estudio es igual o menor al ecológico mínimo necesario, no debe realizar por ninguna circunstancia extracciones de estos cuerpos de agua (SE, 2012).

En la localidad La Grulla se observó que continúa realizándose actividad ganadera tal como lo documentó Ruiz-Campos (2017) y González-De La Barrera (2021) representando un impacto para los hábitats donde habita esta trucha, debido principalmente a que el pisoteo en los bancos del arroyo por el ganado y la remoción de la vegetación allí presente, promueve la erosión del banco e incrementa el azolvamiento del canal del arroyo, lo cual reduce la profundidad y aumenta la temperatura del agua (Zoellick y Cade, 2006; Ruiz-Campos, 2017). Otra consecuencia de la ganadería en sitios adyacentes a arroyos, es el incremento de materia orgánica en los arroyos ocasionado por heces fecales, pudiendo provocar crecimiento de cianofíceas que promueven eutrofización, lo cual sería perjudicial para las truchas, provocando condiciones anóxicas o letales para las mismas (ProMED, 2016). Se realizó un análisis retrospectivo de la ciénega La Grulla, donde se encontró el evidente impacto de la ganadería sobre la vegetación, destrucción en el hábitat del ratón meteoro de California (*Microtus californicus*), considerada una especie endémica de mamífero pequeño (Guevara-Carrizales et al., 2016), demostrando con ello, que no solo la trucha *O. m. nelsoni* es la única especie impactada por esta actividad antropogénica.

9.2.3 Análisis de amenazas

Dentro de los impactos identificados en esta investigación, el de mayor amenaza será la reducción en los regímenes de flujo de los arroyos, principalmente debido al desvío de flujo del caudal para irrigación agrícola, ocasionando una serie de problemáticas como lo es la modificación de los regímenes de flujo y un incremento en la temperatura y un cambio en el patrón de nutrientes que fluyen cuenca abajo (Marcus et al., 1990; Ruiz-Campos, 2017). En segundo lugar, quedó el futuro declive poblacional de *O. m. nelsoni*, principalmente por el aumento de la temperatura en los arroyos por efecto del cambio climático global y por la competencia de hábitat y alimento con especies exóticas (Meza-Matty et al., 2021).

9.2.4 Análisis de riesgo (FISK)

Debido a que una de las mayores amenazas para la especie endémica *O. m. nelsoni* durante éste análisis, será la competencia con especies exóticas, se realizó un análisis de riesgo con la herramienta de identificación de riesgos para especies exóticas de peces, mejor conocido como Freshwater Fish Invasiveness Scoring Kit (FISK por sus siglas) aplicándolo en las especies exóticas identificadas por Ruiz-Campos et al. (2000 y 2014b) en la parte baja del arroyo Santo Domingo, con el fin de determinar su potencial de invasividad en los sitios donde habita la trucha endémica en un futuro cercano.

Dicha herramienta ha sido ampliamente utilizada para la identificación de riesgos, con aplicaciones publicadas por todo el mundo (Copp, 2013; Vilizzi y Copp, 2012; Almeida et al., 2013; Puntilla et al., 2013; Tarkan et al., 2013; Larry et al., 2015). Recientemente las actualizaciones (FISK v2), se efectuaron con el fin de incorporar esta herramienta a diferentes zonas climáticas, entre ellas zonas mediterráneas (Almeida et al., 2013; Simonivić et al., 2013).

En este análisis encontramos que *Lepomis cyanellus* obtuvo el mayor índice de invasividad (27), obteniendo un nivel de umbral de alto riesgo, mientras que la otra

especie íctica analizada, *Gambusia affinis* también fue considerada por la herramienta FISK de alto riesgo al poseer un valor de invasividad de 22.5.

9.3 Construir y analizar el modelo FPEIR durante esta investigación

En el presente trabajo, se formularon los indicadores para el monitoreo del plan de manejo integral de la cuenca del río Santo Domingo, basados en el modelo FPEIR, revisando la literatura y a través de la consulta de expertos para la identificación de criterios, y con ello, fueron seleccionados y analizados dichos indicadores, aplicados a las amenazas presentes encontradas en esta área de estudio, tal y como lo recomienda la OCDE (2007). Después de haber analizado cada uno de estos indicadores, se construyó el esquema del modelo FPEIR de este trabajo, con el objetivo de generar una visión global de las problemáticas que ahí acontecen, en el cual fueron integrados los indicadores de fuerzas motrices, presión, estado, impacto y respuesta estudiados durante esta investigación.

9.4 Propuesta de conservación y manejo integral

9.4.1 Mapa con el índice EstPre

El índice EstPre indicó que las localidades estudiadas tienen una alta vulnerabilidad, debido a que la densidad poblacional de truchas es estable actualmente, coincidiendo con lo mencionado por Ruiz-Campos (2017), sin embargo, cada localidad posee numerosas presiones, especialmente, el desvío de flujo del caudal para irrigación agrícola presente en la localidad San Antonio de Murillos (localidad tipo) y posiblemente abarcando cuenca arriba, hasta las localidades El Potrero y La Grulla, siendo ésta la amenaza con mayor puntuación en el análisis de amenazas.

Por otro lado, el calentamiento global, y con ello la adaptación de especies exóticas en un futuro en los sitios donde se distribuye la trucha, implicará otra seria amenaza contra la trucha endémica y sus hábitats, Por tanto, este índice utilizado, nos ofrece una amplia visión de cómo está el sistema y cuales amenazas lo están abordando, además de priorizar que localidades requieren una mayor protección. De acuerdo con lo mencionado por Jackson y colaboradores (2000), explican que los índices elegidos deberán de dar información relevante que nos lleve a conocer las condiciones ecológicas actuales y, asegurar y demostrar las medidas de los recursos evaluados.

9.4.2 Actores potenciales

Para este apartado fue elaborada una tabla de actores potenciales para llevar a cabo las propuestas de manejo en los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, en conjunto con los habitantes locales de esta cuenca y del Parque Nacional San Pedro Mártir, además de personas representantes de instituciones gubernamentales y no gubernamentales, organizaciones sociales e instituciones académicas, todo ello para llevar a cabo las integraciones de los proyectos sugeridos en pro de la protección integral de la cuenca del río Santo Domingo, la cual posee varias formas endémicas tanto de especies vegetales (Thorne et al.,

2010) y de fauna (Guevara-Carrizales et al., 2016; Ruiz-Campos, 2017) protegidas por la leyes mexicanas en materia de conservación.

9.4.3 FODA

Esté método permitió la identificación de las limitantes y oportunidades que se presentan en la protección de los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, donde debe trabajarse principalmente con la delimitación de zonas prioritarias para conservación y, con la prohibición de tuberías o cualquier otra obra hidráulica, cuya finalidad tienen, desviar el flujo del caudal para irrigación agrícola en los valles costeros de Camalú y Vicente Guerrero (Ruiz-Campos, 2017), la cual es la principal amenaza contra la supervivencia de la subespecie endémica *O. m. nelsoni* y sus hábitats. Por otro lado, deberán realizarse lo antes posible campañas de concientización hacia los pobladores locales sobre la importancia de la conservación de la trucha y sus hábitats, mostrándoles la importancia que tienen hacia su entorno y todas las funciones que cumple, así mismo, mostrarles que es una subespecie única y un recurso invaluable que poseen.

9.4.4 Estrategias de conservación

Bonnell (2009) y Flores-Galván (2013) mencionan que el manejo de ecosistemas es el encargado de describir las condiciones ecológicas, las cuales son necesarias para mantener y asegurar un ecosistema sano, así como las acciones que se necesitan para llegar a ello, para lo cual, durante este proceso es de suma importancia la interacción y comunicación entre los participantes del proyecto, la sociedad e instituciones, para que en un futuro, puedan mejorarse las propuestas conforme los requerimientos sean solicitados para mantener la integridad y calidad ambiental.

10. Conclusiones

1. Este estudio que implicó el análisis integral del estado actual de la población de la trucha endémica y sus hábitats en la cuenca del río Santo Domingo en la Sierra San Pedro Mártir, aportó los fundamentos para proponer ante la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), que el sitio del arroyo San Antonio de Murillos en el rancho San Antonio (localidad tipo) sea establecida como un Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC) para el resguardo del germoplasma endémico de esta subespecie protegida por la NOM-059.
2. La evaluación poblacional y de hábitats de esta trucha durante los últimos 30 años, junto con el análisis de amenazas y riesgos potenciales de los mismos por factores naturales (cambio climático) y antrópicos (reducción del caudal por desvío y entubamiento) en la cuenca del río Santo Domingo, permitió dar los elementos justificativos para proponer el cambio de estatus de conservación de esta trucha en la NOM-059 vigente, de protección especial a amenazada.
3. La figura endémica de la trucha *O. m. nelsoni* deberá ser resaltada y ponderada en los programas de manejo y conservación de especies prioritarias de la Sierra San Pedro Mártir, principalmente por ser la subespecie más austral del complejo arcoíris en Norteamérica y la única forma endémica de pez dulceacuícola en Baja California.
4. Este estudio recupera, sistematiza, y analiza de manera integral la información generada durante más de 30 años de investigación sobre la biología, ecología poblacional, hábitat y conservación de esta trucha bajacaliforniana en la Sierra San Pedro Mártir. Lo anterior dio como productos resultantes: (1) propuesta de acciones de conservación para la subespecie y sus hábitats, (2) estrategias de ordenamiento de las actividades en la cuenca, (3) identificación de sitios potenciales como áreas naturales protegidas de tipo voluntario, y (4) propuestas de acciones de manejo y las instancias ejecutoras para la conservación, mitigación y restauración de hábitats.

5. Esta investigación permitió identificar, analizar y dimensionar las dos amenazas más importantes en torno a la integridad de las poblaciones de la trucha endémica y sus hábitats en la cuenca del río Santo Domingo, mismas que han sido generadas por actividades antropogénicas y naturales: a) reducción de caudal de los arroyos por desvío y entubamiento del flujo para la irrigación agrícola en los valles costeros de Camalú y Vicente Guerrero, lo cual generará la falta de conectividad de los arroyos, la disminución de la profundidad y la desaparición de las unidades de hábitats más apropiadas para la trucha. b) El análisis de temperaturas del agua en los arroyos de distribución de la trucha en la Sierra San Pedro Mártir a partir de series de tiempo diario, mensual y anual entre los años 1996 y 2019, permitió pronosticar el intervalo de altitud donde la población de trucha *O. m. nelsoni* se verá afectada por el incremento de la temperatura por efecto del cambio climático global. Los dos escenarios proyectados para los años 2025 y 2050 indican que en la localidad tipo (arroyo San Antonio de Murillos en Rancho San Antonio, 553 msnm), la población de trucha será afectada por temperaturas críticas o letales por arriba de los 28 °C. En el escenario de 2025, las temperaturas no críticas o letales (< 28 °C) se registrarán a partir de los 868-898 msnm; mientras que en el escenario de 2050 estas temperaturas serán a partir de los 908 y 1,028 msnm. En ambos escenarios el ámbito de distribución altitudinal de la trucha se reducirá de 21-23% para el año 2025 y 23-31% para el año 2050.

6. La densidad poblacional actual de la trucha en la cuenca del río Santo Domingo continúa aún estable en los sitios de los arroyos San Antonio de Murillos y El Potrero, aunque en el sitio de arroyo La Grulla la densidad poblacional ha exhibido en el último lustro una disminución por la reducción de hábitat por el crecimiento de macrófitas acuáticas.

7. Las unidades de hábitat que presentan una mayor capacidad de carga de individuos de trucha y que pueden ser considerados como referencia para fines de repoblación, mejoramiento de hábitat o restauración en la cuenca del río Santo Domingo, son las pozas de canal de confluencia (0.2 ind/m²), pozas en escalón (0.07 ind/m²) y pozas de erosión lateral (0.06 ind/m²).

8. La distribución espacial de la trucha *O. m. nelsoni* en los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo se ajusta a la forma metapoblacional de tipo Continente.

9. El análisis paisajístico de los sitios de distribución de la trucha *O. m. nelsoni* en la cuenca del río Santo Domingo se compone de siete tipos de unidad de hábitat: a) poza de erosión central (PEC), b) corriente de flujo laminar (CFL), c) poza en escalón (PES), d) corriente (COR), e) poza de canal de confluencia (PCC), f) poza de erosión lateral (PEL) y f) corriente en Escalón (COE). De acuerdo con la métrica CAP, la unidad de hábitat matriz fue poza de erosión central (PEC), ya que fue la de mayor cobertura espacial.

10. El grupo de potencial “Alto” en la clasificación del indicador DIPOT fue el más numeroso con 10 unidades en total (55% del total), indicando con ello que la mayoría de las unidades presentes tienen gran cantidad de atributos como sistemas de conservación.

11. Las composiciones hidrogeoquímicas en el agua difirieron entre sitios de diferente elevación en la cuenca del río Santo Domingo, dominando el tipo Ca-Na-HCO₃ en La Grulla (2,080 msnm), el tipo Ca-Na-HCO₃-Cl en El Potrero (950 msnm), y los tipos Ca-Na-HCO₃-Cl y Ca-Na-HCO₃ en los sitios de arroyo de menor altitud como San Antonio (585 msnm), La Zanja (580 msnm) y San Antonio de Murillos (553 msnm).

12. Con fundamento en los resultados del análisis de los principales cationes y aniones de las muestras de agua realizados en los diferentes arroyos de la cuenca del río Santo Domingo, se encontraron valores de nitrato por arriba del límite establecido por la NOM-127-SSA1-1994 en las localidades La Zanja y San Antonio de Murillos.

13. La herramienta FISK identificó que las dos especies exóticas *Lepomis cyanellus* y *Gambusia affinis*, encontradas actualmente cuenca abajo, representan un nivel de umbral de alto riesgo a futuro (valor de 27 y 22.5, respectivamente) en los cuerpos de agua donde habita la trucha endémica, lo cual será facilitado por el incremento proyectado de la temperatura del agua por efecto del cambio climático global.

14. El índice estado-presión (EstPre) indicó que los arroyos de la cuenca del río Santo Domingo se encuentran actualmente con una calidad alta para el desarrollo del pez endémico *O. m. nelsoni*, aunque esta condición se vería afectada si no se establece una serie de medidas de manejo y conservación de esta cuenca y de acciones de mitigación ante el inminente cambio climático global.

15. Finalmente, las estrategias que se presentan permitirán coadyuvar a la solución de los problemas en un esquema de corresponsabilidad, generando una oportunidad para el trabajo colaborativo entre las instituciones de gobierno y la sociedad informada.

11. Bibliografía

- Abadía-Cardoso, A., Pearse, D., Jacobson, S., Marshall, J., Dalrymple, D., Kawasaki, F., Ruiz-Campos, G. y Garza, J. C. (2016). Population genetic structure and ancestry of steelhead/rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) at the extreme southern edge of their range in North America. *Conservation Genetics*. DOI: 10.1007/s10592-016-0814-9.
- Abatzoglou, J. T. y Redmond, K. T. (2007). Asymmetry between trends in spring and autumn temperature and circulation regimes over western North America. *Geophysical Research Letters*, 34: L18808.
- Acosta, J. G., Simonetti, A., Bustamante, O. y Dunstone, N. (2003). Metapopulation approach to assess survival of *Oncifelis guigna* in fragmented forest of central Chile: A theoretical model. *Mastozoología Neotropical*, 10(2):217-229.
- Aguilar-Juárez, M. (2010). Inducción a la madurez gonádica y conservación del esperma de la trucha de San Pedro Mártir *O. m. nelsoni* (Evermann). Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Marinas-Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada.
- Allen, K. R. (1969). Limitation on production in salmonid populations in streams. En T. G. Northcote (ed.), *Symposium on salmon and trout streams* (pp. 3-18). Vancouver: H. R. MacMillan Lectures in Fisheries/University of British Columbia.
- Allendorf, F. W., Leary, R. F., Spruell, P. y Wenburg, J. K. (2001). The problems with hybrids: setting conservation guidelines. *Trends in Ecology and Evolution*, 16:613-622.
- Almeida, D., Ribeiro, F., Leunda, P.M., Vilizzi, L. y Copp, G.H. (2013). Effectiveness of FISK, an invasiveness screening tool for non-native freshwater fishes, to perform risk identification assessments in the Iberian Peninsula. *Risk Analysis*, 33(8):1404-1413.

- Álvarez, M. y Maisterrana, J. (1977). Observaciones meteorológicas y climatológicas en la sierra San Pedro Mártir. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 2(43).
- Álvarez, M. (1985). Climatología de la sierra San Pedro Mártir. *Proceedings of the desert ishes council*, 13:331-342.
- Andrade, J., M. H., Morales, G. y Hernández, A. (1999). Guía de análisis de impactos y sus fuentes en áreas naturales. *The Nature Conservancy*, 45.
- AQUA (2016). Bloom de algas provoca muerte de salmones en Chiloé. Internet, extraído en 17 dic. 2016, disponible en: <http://www.aqua.cl/2016/01/29/bloom-de-algas-provoca-muerte-de-salmones-en-chiloe/>.
- Azuz-Adeath, I., Espejel, I., Rivera-Arriaga, E., Ferman, J. L. y Seingier, G. (2010). Referentes internacionales sobre indicadores e índices. Historia y estado del arte, p. 845-858. En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual y G.J. Villalobos-Zapata (eds.). Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino. Universidad Autónoma de Campeche, Cety-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944 p.
- Bachman, R. A. (1984). Foraging behavior of free-ranging wild and hatchery brown trout in a stream. *Transcations of the American Fisheries Society*, 113, 1-32.
- Bain, M. B. y Stevenson, N. J. (1999). Aquatic habitat assessment: common methods. *Fisheries Society, Bethesda*, MD. 216 pp.
- Baker, R. H. A., Black, R., Copp, G. H., Haysom, K. A., Hulme, P. E., Thomas, M. B., Brown, A., Brown, M., Cannon, R. J. C., Ellis, J., Ellis, M., Ferris, R., Glaves, P., Gozlan, R. E., Holt, J., Howe, L., Knight, J. D., MacLeod, A., Moore, N. P., Mumford, J. D., Murphy, S. T., parrott, D., Sansford, C. E., Smith, G. C., St-Hilaire, S. y Ward, N. L. (2008). The UK risk assessment scheme for all non-native species En: *Neobiota Series*: In Press. Pp.

- Baltz, D. M., Vondracek, B., Brown, L. R. y Moyle, P. B. (1991). Seasonal changes in microhabitat selection by rainbow trout in a small stream. *Transactions of the American Fisheries Society*, 120(2):166-176.
- Barajas, A. M. (1991). La Sierra de San Pedro Mártir: crecimiento de un gigante. Pags. 27-28 En Memoria III Semana de la Exploración y la Historia: Sierra de San Pedro Mártir. C. Lazcano (ed). Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada (B.C.).
- Barnett, T. P., Pierce, D. W., Hidalgo, H. G., Bonfils, C., Santer, B. D., Das, T., Bala, G., Wood, A. W., Nozawa, T., Mirin, A. A., Cayan, D. R. y Dettinger, M. D. (2008). Human induced changes in the hydrology of the western United States. *Science*, 319:1080-1083.
- Bartholow, J. M. (2005). Recent water temperature trends in the lower Klamath River, California. *North American Journal of Fisheries Management*, 25:152–162.
- Battin, J., M. W. Wiley, M. H. Ruchelshaus, R. N. Palmer, E. Korb, K. K. Bartz y H. Imaki (2007). Projected impacts of climate change on salmon habitat restoration. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 104:6720–6725.
- Behnke, R. J. (1992). Native trout of western North America. EUA: *American Fisheries Society*, (Monograph 6).
- Behnke, R. J. (2002). Trout and salmon of North America. Nueva York: The Free Press.
- Bennet, A. F. (2003). Linkages in the Landscape The Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. 262.
- Berg, W. J. y Gall, G. A. E. (1988). Gene flow and genetic differentiation among California coastal rainbow trout populations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 45:122-131.
- Bidgood, B. F. y Berst, A. H. (1969). Lethal temperatures for Great Lakes rainbow trout. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 26:456-459.

- Bisson, P. A. y Davis, G. E. (1976). Production of juvenile chinook salmon, *Oncorhynchus tshawytscha*, in a heated model stream. *Fishery Bulletin*, 74:763-774.
- Blake, B., Thompson, B., Polk, W., Johnson, J., Duckworth, B. y Stan, B. (2005). S.W.O.T. ANALYSIS Identifying Your Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats. *Texas Cooperative Extension*, 1-18.
- Bobadilla, M., M. Espejel, F. Lara, S. Álvarez, S. Borrego, S. Ávila, F. Almada, y J. Luis (2013). Esquema de evaluación para instrumentos de política ambiental. *Política y cultura*, (40):99- 122.
- Bonnell, J. (2009). Ecosystems and Ecosystem Management. *Agriculture and Natural Resources*, 6(09):1-4.
- Breceda, A. L. (2005). Uso de los recursos naturales en los oasis de Baja California Sur. I taller sobre los oasis del Noroeste de México (Resúmenes). Programa de planeación ambiental y conservación. Centro de Investigadores biológicas del Noroeste S.C. La Paz, Baja California. 25pp.
- Burel, F. y Baudry, J. (2003). Landscape Ecology: Concepts, Methods, and Applications. Enfield, N.H.: *Science Publishers, Inc.*, 394.
- Burner, C. J. (1951). Characteristics of spawning nests of Columbia River salmon. *Fishery Bulletin*, 52 (61):97-110.
- Camarena-Rosales, F., Ruiz-Campos, G., De La Rosa-Vélez, J., Mayden, R. L, Hendrickson, D. A.,Varela-Romero, A. y García de León, F. J. (2008). Mitochondrial haplotypes variation in wild trout populations (Teleostei: Salmonidae) from Northwestern Mexico. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 18:33-45.
- Cargill, A. S. (1980). Lack of rainbow trout movement in a small stream. *Transactions of the American Fisheries Society*, 10:484-490.

- Casas-Jiménez, J. J., López-López, M. J., Salinas-Bonillo, M. J., Gisbert-Gallego, J., Giménez-Luque, E., García-Barroso, F., Sánchez-Gómez, S., Lacalle-Marcos, A., Cortés-Montoya, A. y Moyano-López, F. J. (2017). Guía para la realización de un Estudio de Investigación Ambiental. El caso de la cuenca del río Adra. Edual, España. 308 pp.
- Christensen, J. H. y Christensen, O. B. (2003). Climate modelling: Severe summertime flooding in Europe. *Nature Publishing Group*, 421:805–806.
- Collinge, S. K. y Forman, R. T. (2009). Ecology of Fragmented Landscapes. Baltimor, MD, USA. *Johns Hopkins University Press*, 358.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2009). Programa de conservación y manejo del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir. Ensenada, B. C. 73 pp.
- Conde, D. A., Flesness, N., Colchero, F., Jones, O. R. y Scheuerlein, A. (2011). An emerging role of zoos to conserve biodiversity. *Science*, 331:390-1391.
- Copp, G. H. (2013). The Fish Invasiveness Screening Kit (FISK) for Non-native Freshwater Fishes – a summary of current applications. *Risk Analysis*, 33:1394–1396.
- Copp, G. H., Vilizzi, L., Mumford, J., Fenwick, G. V., Godard, M. J. y Gozlan, R. E. (2009). Calibration of FISK, an invasive-ness screening tool for non-native freshwater fishes. *Risk Analysis*, 29:457–467.
- Cornell, J. E., Gutiérrez, M., Wait, A. D. y Rubio-Arias, H. O. (2008). Ecological characterization of a riparian corridor along the Río Conchos, Chihuahua, Mexico. *The Southwestern Naturalist*, 53:96-100.
- Crozier, L. G. y Zabel, R. W. (2006). Climate impacts at multiple scales: evidence for differential population responses in juvenile Chinook salmon. *Journal of Animal Ecology*, 75:1100-1109.

- Crozier, L., Zabel, R. W. y Hamlet, A. F. (2008). Predicting differential effects of climate change at the population level with life-cycle models of spring Chinook salmon. *Global Change Biology* 14: 236-249.
- Cucherousset, J. y Olden, J. D. (2011). Ecological impacts of non-native freshwater fishes. *Fisheries*, 36:215-230.
- Daufresne, M. D. y Boet, P. (2007). Climate change impacts on structure and diversity of fish communities in rivers. *Global Change Biology*, 13:2467–2478.
- Delworth, T. L., Stouffer, R. J., Dixon, K. W., Spelman, M. J., Knutson, T. R., Broccoli, A. J., Kushner, P. J. y Wetherald, R. T. (2002). Simulation of climate variability and change by the GFDL R30 coupled climate model. *Climate Dynamics*, 19:555-574.
- Departamento de Servicios de Salud de California, Rama de Investigaciones de Salud Ambiental (2006). Posibles efectos en la salud relacionados con nitratos y nitritos en agua de pozos privados. En línea: https://cchealth.org/eh/small-water/pdf/nitrate_fact_sheet_pww_es.pdf. (consulta 01 de noviembre 2021).
- Dolloff, C. A., Hankin, D. G. y Reeves, G. H. (1993). Basinwide estimation of habitat and fish populations in streams. USFS Southeastern Forest Experiment Station, Carolina del Norte, E.U.A. (SE-83), 25 p.
- Dulzaides-Iglesias, M. E. y Molina-Gómez, A. M. (2004). Análisis documental y de información: dos componentes de un mismo proceso. *ACIMED*, v.12 n.2.
- Dunham, J. B., Young, M. K., Gresswell, R. E. y Rieman, B. E. (2003). Effects of fire on fish populations: landscape perspectives on persistence of native fishes and nonnative fish invasions. *Forest Ecology and Management*, 178:183–196.
- Escalante, M. A., García-de-León, F. J., Dillman, C. B., De los Santos, A., George, A. y Barriga-Sosa, I. A. (2016). Introgresión genética de la trucha arcoíris exótica en poblaciones de trucha dorada mexicana. En: Ruíz-Luna, A. y García-De León,

- F. J. (eds). La trucha dorada mexicana. 2016. CIAD-CONACYT-CIB. México. 125-136 pp. ISBN: 978-607-7900-26-9.
- Escofet, G. A. (1994). Evaluación del hábitat y de fuentes de disturbio. En: Guadalupe de la Lanza-Espino y Carlos Cáceres-Martínez., Editores, "Lagunas Costeras y el Litoral Mexicano.". UNAM-UABCS. pp 497-525 p.
- Evermann. B. W. (1908). Descriptions of a new species of trout (*Salmo nelsoni*) and a new cyprinodont (*Fundulus meeki*) with notes on other fishes from Lower California. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 21:19-30.
- Fausch, K. D., Rieman, B. E., Young, M. K. y Dunham, J. B. (2006). Strategies for conserving native salmonid populations at risk from nonnative fish invasions: tradeoffs in using barriers to upstream movement. General Technical Report RMRS-GTR-174. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado, USA.
- Flebbe, P. A., Roghair, L. D. y Bruggink, J. L. (2006). Spatial modeling to project southern Appalachian trout distribution in a warmer climate. *Transactions of the American Fisheries Society*, 135:1371–1382.
- Flores-Galván, M. A. (2013). Propuesta de manejo para el pez cachorrito del desierto (*Cyprinodon macularius* Baird & Girard) en la laguna de la planta geotérmica de cerro prieto, Baja California, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California, México.
- Forman, R. T. y Gordon, S. M. (1981). Patches and Structural Components for a Landscape Ecology Author(s). *BioScience*, 31(10):733-740.
- Forman, R. T. y Gordon, S. M. (1986): Landscape Ecology, Wiley, Chichester.
- Forman, R. T. (1995). Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology*, 10(3):133-142.

- Gastil, R. G., Krummenacher, D. y Minch. J. (1979). The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California. *Geological Society of America Memoirs*, 90(9):839-857.
- Gastil, R. G., Phillips, R. P. y Allison, E. C. (1975). Reconnaissance geology of the State of Baja California. *Geol. Soc. of America, Memoir* 140. 170 pp.
- Gerking, S. D. (1953). Evidence for the concepts of home range and territory in stream fishes. *Ecology*, 34:347-365.
- Gerking, S. D. (1959). The restricted movement of fish populations. *Biological Reviews*, 34:224-242.
- Gilabert-Alarcón, C. (2018). Efectos por la descarga del agua residual por la descarga del agua residual tratada en el acuífero de Maneadero, Baja California, México. Tesis de Doctorado. Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada.
- González-De La Barrera, D. M. (2021). Distribución y abundancia de mamíferos medianos y grandes en diferentes niveles de pastoreo por Ganado en la pradera de La Grulla, Sierra de San Pedro Mártir, Baja California: período 2015-2019. Septiembre de 2020. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California, México.
- Guevara-Carrizales, A. A., Ruiz-Campos, G., Escobar-Flores, J. y Martínez-Gallardo, R. (2016). Mamíferos terrestres de las ecorregiones áridas del estado de Baja California. En M. Briones-Salas, Y. Hortelano-Moncada, G. Magaña-Cota, G. Sánchez y J. E. Sosa-Escalante (eds.), *Riqueza y conservación de los mamíferos en México a nivel estatal* (pp. 63-90). México: Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México/Asociación Mexicana de Mastozoología A. C./Universidad de Guanajuato.
- Hamlet, A. F. y Lettenmaier, D. P. (2007). Effects of 20th century warming and climate variability on flood risk in the western U.S. *Water Resources Research*, 43: W06427.

- Hanski, I. A., y Gaggiotti, O. E. (2004). Ecology, Genetics and Evolution of Metapopulations. Burlington, MA, USA. Academic Press, 717.
- Harrison, S. (1991). Local extinction in a metapopulation context: an empirical evaluation. *Biological Journal of the Linnean Society*, 42:73-88.
- Heino J., Virkkala R. y Toivonen, H. (2009). Climate change and freshwater biodiversity: detected patterns, future trends and adaptations in northern regions. *Biological Reviews*, 84:39–54.
- Hesthagen, T. (1990). Home range of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*, and brown trout, *Salmo trutta*, in a Norwegian stream. *Freshwater Biology*, 24:63-67.
- Hitt, N. P. (2003). Immediate effects of wildfire on stream temperature. *Journal of Freshwater Ecology*, 18:171–173.
- Hubbs, C. L. (1946). Wandering of pink salmon and other salmonid fishes into southern California. *California Fish and Game*, 32:81-86.
- Huey, L. M. (1964). The mammals of Baja California, Mexico. Transactions of the San Diego Society of National History, 13: 85-168.
- Hynes, H. B. N. (1972). The ecology of running waters. Liverpool University Press, Liverpool. 555 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2000). Principales resultados del Censo de Población y Vivienda 2000. México. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). Climate change 2007: the physical science basis. <http://www.ipcc.ch>.
- Irastorza-Vaca, P. (2006). Integración de la ecología del paisaje en la planificación territorial aplicada a la comunidad de Madrid. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid, España.

- Istanbulluoglu, E., Tarboton, D. G., Pack, R. T. y Luce, C. H (2004). Modeling of the interactions between forest vegetation, disturbances, and sediment yields. *Journal of Geophysical Research*, 109: F01009.
- Jackson, L. E., Kurtz, J. C. y Fisher, W. S. (2000). Evaluation Guidelines for Ecological Indicators. Washington D.C. EPA/620/R-99/005. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Research Triangle Park. 107.
- Jelks, H. L., Walsh, S. J., Burkhead, N. M., Contreras-Balderas, S., Diaz-Pardo, E., Hendrickson, D. A., Lyons, J., Mandrak, N. E., McCormick, F., Nelson, J. S., Platania, S. P., Porter, B. A., Renaud, C. B., Schmitter-Soto, J. J., Taylor, E. B. y Warren Jr., M. L. (2008). Conservation status of imperiled North American freshwater and diadromous fishes. *Fisheries (Bethesda)*, 33:372-407.
- Kammerer, B. D. y Heppell, S. A. (2013a). The effects of semichronic thermal stress on physiological indicators in steelhead. *Transactions of the American Fisheries Society*, 142:1299-1307.
- Kammerer, B. D. y Heppell, S. A. (2013b). Individual condition indicators of thermal habitat quality in field populations of Redband Trout (*Oncorhynchus mykiss gairdneri*). *Environmental Biology of Fishes*, 96:823-835.
- Kindlmann, P. y Burel, F. (2008). Connectivity measures: a review. *Landscape Ecol*, 23:879-890.
- Kratter, A. W. (1991). First nesting record for Williamson' s Sapsucker (*Sphyrapicus thyroideus*) in Baja California Mexico, and comments on the biogeography of the fauna of the sierra San Pedro Mártir. *The Southwestern Naturalist*, 36:247-250.
- Larry, L. L., Hill, J. E., Hardin, S., Vilizzi, L. y Copp, G. H. (2015). Evaluation of the Fish Invasiveness Screening Kit (FISK v2) for peninsular Florida. *Management of Biological Invasions*, 6(4):413-422.
- Lehmann CH, 1986. [Geometría analítica]. [Book in Spanish]. Editorial Limusa, Mexico.

- Leitao, A. B., Miller, J., Ahern, J. y McGarigal, K. (2006). The Selected Set of Landscape Metrics. En *Measuring Landscapes: a planner's handbook* (págs. 63-93). Washington D.C.: Island Press.
- Leppi, J. C., DeLuca, T. H., Harrar, S. y Running, S. W. (2010). August stream discharge trends portend impacts of climate change in the northern rockies. In Carline, R. F., and C. LoSapio (eds.), *Conserving wild trout* (pp. 24-31). Bozeman, Montana: Proceedings of the Wild Trout X symposium.
- Levins, R. (1968). *Evolution in changing environments*. Princeton, Nueva Jersey: Princeton University Press.
- Lima, P. (2019). Uso de Isotopos Estables para el Estudio de las Fuentes de Agua Superficiales en el Ecuador y sus Implicaciones para la Gestión de los Recursos Hídricos. *INGENIO*, 2(2):38–45.
- López, R., y Becerril, F. (2000). ¿Meta... qué? ¡Metapoblación! *Ciencia y Mar*, 29-35.
- Luce, C. H. y Holden, Z. (2009). Declining annual streamflow distributions in the Pacific Northwest United States, 1948– 2006. *Geophysical Research Letters*, 36: L16401.
- Lund, S. G., Caissie, D., Cunjak, R. A, Vijayan, M. M. y Tufts, B. L. (2002). The effects of environmental heat stress on heat-shock mRNA and protein expression in Miramichi Atlantic salmo (*Salmo salar*) parr. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59:1553-1562.
- Luque, S., Saura, S. y Fortin, M. J. (2012). Landscape connectivity analysis for conservation: insights from combining new methods with ecological and genetic data. *Landscape Ecol* (2012), 27:153–157.
- Lyons, J., Zorn, T., Stewart, J., Seelbach, P., Wehrly, K. y Wang, L. (2009). Defining and characterizing coolwater streams and their fish assemblages in Michigan and Wisconsin, USA. *North American Journal of Fisheries Management*, 29:1130-1151.

- MacArthur R. H. y Wilson E. O. (1967). The theory of island biogeography. Princeton University Press, Princeton.
- Magnuson, J. J., Webster, K. E., Assel, R. A., Bowser, C. J., Dillon, P. J., Eaton, J. G., Evans, H. E., Fee, E. J., Hall, R. I., Mortsch, L. R., Schindler, D. W. y Quinn, F. H. (1997). Potential effects of climate changes on aquatic systems: Laurentian Great Lakes and Precambrian Shield Region. *Hydrological Processes*, 11:825-871.
- Marcus, M. D., Young, M. K., Noel, L. E. y Mullan, B. A. (1990). Salmonid- Habitat relationships in the western United States. Gen. Tech. Rep. RM-188. Fort Colling, CO; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiments Station.
- Marine, K. R. y Cech, J. J. (2004). Effects of high water temperature on growth, smoltification, and predator avoidance in juvenile Sacramento River Chinook Salmon. *North American Journal of Fisheries Management*, 24:198–210.
- Matthews, K. R. y Berg, N. H. (1997). Rainbow trout responses to water temperature and dissolved oxygen stress in two southern California stream pools. *Journal of Fish Biology*, 50:50-67.
- Matthews, K. R. (2011). California golden trout and climate change: is their stream habitat vulnerable to climate warming? En Carline, R. F., y C. LoSapio (eds.), *Conserving wild trout* (pp. 81-87). Bozeman, Montana: Proceedings of the Wild Trout X symposium.
- Meigs, Peveril, III. (1935). The Dominican Mission Frontier of Lower California. University of California Publications in Geography No. 7 Berkeley.
- Meling-Pompa, D. (1991). La ganadería de San Pedro Mártir. Pp. 17-19. In Bernaldez-Garza (ed.), *Memoria de la III Semana de Exploración y la Historia, sierra San Pedro Mártir*. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México.

- Mellink, E. (1991). Mamíferos conocidos de la sierra San Pedro Mártir. En C. Lazcano (ed.), Memoria III Semana de la Exploración y la Historia: sierra San Pedro Mártir (pp. 45-48). Ensenada: Universidad Autónoma de Baja California.
- Mesa, M. G., Weiland, L. K. y Wagner, P. (2002). Effects of acute thermal stress on the survival, predator avoidance, and physiology of juvenile fall Chinook salmon. *Northwest Science*, 76:118-128.
- Meza-Matty I. A., Ruiz-Campos, G., Daesslé, L. W., Ruiz-Luna, A., López-Lambraño, Á. A, Camarena-Rosales, F. y Matthews, K. R. (2021). Daily, seasonal, and annual variability of temperature in streams inhabited by the endemic San Pedro Martir trout (*Oncorhynchus mykiss nelsoni*), in Baja California, Mexico, and the predicted temperature for the years 2025 and 2050. *Journal of limnology*, 80(2).
- Miller, R. B. (1957). Permanence and size of home territory in stream-dwelling cutthroat trout. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 14:687-691.
- Morgan, P. E., Heyerdahl, K. y Gibson, C. E. (2008). Multiseason climate synchronized widespread forest fires throughout the 20th century, Northern Rockies, USA. *Ecology*, 89:717-728.
- Morrison, J., Quick, M. C. y Foreman, M. G. C. (2002). Climate change in the Fraser River watershed: flow and temperature projections. *Journal of Hydrology*, 263:230–244.
- Mote, P. W., Hamlet, A. F., Clark, M. P. y Lettenmaier, D. P. (2005). Declining mountain snowpack in western North America. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86:39–49.
- Mote, P. W., Parson, E. A., Hamlet, A. F., Ideker, K. N., Keeton, W. S., Lettenmaier, D. P., Mantua, N. J., Miles, E.L., Peterson, D.W., Peterson, D.L., Slaughter, R. y Snover, A. K. (2003). Preparing for climatic change: the water, salmon, and forests of the Pacific Northwest. *Climatic Change*, 61:45-88.

- Nakano, S., Kitano, F. y Maekawa, K. (1996). Potential fragmentation and loss of thermal habitats for charrs in the Japanese archipelago due to climatic warming. *Freshwater Biology*, 36:711–722.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenham, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grubler, A., Jung, T. Y. y Kram, T. (2000). Special report on emissions scenarios. Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge.
- Needham, P. R. (1938). Notes in the introduction of *Salmo nelsoni* Evermann into California from Mexico. *Transactions of the American Fisheries Society*, 67:139-146.
- Needham, P. R. (1955). Trail of the Mexican trout. *Pacific Discovery*, 8(4):18-24.
- Needham, P. R., y Gard, R. (1959). Rainbow trout in Mexico and California with notes on the cutthroat series. *University of California Publications in Zoology*, 67:1-124.
- Neel, M. C., McGarigal, K. y Cushman, S. A. (2004). Behavior of class-level landscape metrics across gradients of class aggregation and area. *Landscape Ecology*, 19:435–455.
- Nelson, E. W. (1921). Lower California and its natural resources. *Memoirs of the National Academy of Sciences*, 16:1-194.
- Newman, M. A. (1956). Social behavior and interspecific competition in two trout species. *Physiological Zoology*, 29:64-81.
- Nielsen, L. (1983). Variation in the catchability of yellow perch in the Otter trawl. *Transactions of the American Fisheries Society*, 53-59.
- Norma Oficial Mexicana (NOM) (1994). Salud ambiental, agua para uso y consumo humano—límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización: Norma Oficial Mexicana, NOM-127-SSA1-1994.
- Norma Oficial Mexicana (NOM) (2010). Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres categorías de riesgo y especificaciones para

su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en riesgo. México: Norma Oficial Mexicana, NOM-059-SEMARNAT-2010.

Nusslé, S., Matthews, K. R. y Carlson, S. M. (2015). Mediating water temperature increases due to livestock and global change in high elevation meadow streams of the Golden Trout Wilderness. *PLoS ONE*, 10(11): e0142426. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142426>.

O' Connor, J. E. y Chase, C. G. (1989). Uplift of the sierra San Pedro Mártir Baja California. *Tectonics*, 8:833-844.

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) (2007). Una guía de buenas prácticas en la cooperación para el desarrollo. Paris, Francia: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

Padilla-Cámbara, T. A. y García-Álvarez, N. (2012). Hidroquímica del agua superficial de la subcuenca del río Quiscab, Guatemala Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, vol. 21 diciembre 2012, pp. 17-20 Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez La Habana, Cuba.

Parmesan, C. y G. Yohe (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421:37–42.

Peinado, M., Bartolome, C., Delgadillo, J. y Aguado, I. (1994). Pisos de vegetación de la sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. *Acta Botánica Mexicana*, 29:1-30.

Petersen, J. H. y Kitchell, J. F. (2001). Climate regimes and water temperature changes in the Columbia River: bioenergetic implications for predators of juvenile salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58:1831–1841.

Pope, V.D., Gallani, M. L., Rowntree, P. R. y Stratton, R. A. (2000). The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. *Climate Dynamycs*, 16:123-146.

- ProMED (2016). Marine ecosystem health - Chile: (LG) implications of algal blooms. Internet, extraído en 23 nov. 2016, disponible en: <http://www.promedmail.org/post/4397013>.
- Pulido, J. (2009). Modelos para la gestión turística de parques naturales. Una propuesta para España. *Papers de Turisme*, 45:21-39.
- Pulliam, H. R. (1988). Sources, sinks, and population regulation. *American Naturalist*, 132:652- 661.
- Puntila, R., Vilizzi, L., Lehtiniemi, M. y Copp, G.H. (2013). First application of FISK, the freshwater Fish Invasiveness Screening Kit, in Northern Europe: example of Southern Finland. *Risk Analysis*, 33(8):1397-1403.
- Rahel, F. J. y J. D. Olden. (2008). Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species. *Conservation Biology*, 22:521–533.
- Rantz, S. E. (1964). Stream hydrology related to the optimum discharge for king salmon spawning in the northern California coast range. *Geological Survey Water-Supply*. Paper 1779-A. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
- Rebman, J. P. y Roberts, C. (2012). Baja California plant field guide, tercera edición. San Diego: San Diego Natural History Museum Publication/Subelt Publications Inc.
- Reeves, G. H., Everest, F. H. y Hall, J. D. (1987). Interactions between the redbelt shiner (*Richardsonius balteatus*) and the steelhead trout (*Salmo gairdneri*) in western Oregon: the influence of water temperature. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44:1602-1613.
- Reyes-Coca, S. y García López, J. J. (1991). Climatología de Baja California: sierra de San Pedro Mártir. p. 29-33. *En Memoria III Semana de la Exploración y la Historia: sierra de San Pedro Mártir*. C. Lazcano (ed.). Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada (B.C.).

- Rieman, B. E. y Clayton, J. (1997). Wildfire and native fish: issues of forest health and conservation of native fishes. *Fisheries*, 22:6-15.
- Rieman, B. E. y Isaak, D. J. (2010). *Climate change, aquatic ecosystems, and fishes in the Rocky Mountain West: implications and alternatives for management*. Gen. Tech. Rep. *RMRS-GTR-250*. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Rieman, B. E., Isaak, D. J., Adams, S., Horan, D., Nagel, D., Luce, C. y Myers, D. (2007). Anticipated climate warming effects on bull trout habitats and populations across the Interior Columbia River Basin. *Transactions of the American Fisheries Society*, 136:1552–1565.
- Rieman, B. E., Peterson, J. T. y Myers, D. L. (2006). Has brook trout *Salvelinus fontinalis* displaced bull trout *Salvelinus confluentus* along longitudinal gradients in central Idaho streams? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 63:63–78.
- Rinne, J. N. (1982). Movement, home range, and growth of a rare southwestern trout in improved and unimproved habitats. *North American Journal of Fisheries Management*, 2:150-157.
- Root, T. L., Price, J. T., Hall, K. R., Schneider, S. H., Rosenzweig, C. y Pounds, J. A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421:57–60.
- Ruiz-Campos, G. y Pister, E. P. (1995). Distribution, habitat, and current status of the San Pedro Mártir rainbow trout, *O. m. nelsoni* (Evermann). *Bulletin of the Southern California Academy of Sciences*, 94:131-148.
- Ruiz-Campos, G. y Villalobos-Ramírez, M. M. (1991). A simple technique to making a streamer-type fish tag. *North American Journal of Fisheries Management*, 11:472-476.

- Ruiz-Campos, G. (1993). Bionomía y ecología poblacional de la trucha arcoíris, *O. m. nelsoni* (Evermann), de la sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey.
- Ruiz-Campos, G. (1994). Cultivo experimental de la trucha de San Pedro Mártir, *O. m. nelsoni* (Evermann), para propósitos de repoblación y conservación del germoplasma endémico. Informe Final (Proyecto 0340N-9107), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México.
- Ruiz-Campos, G. (2017). La trucha arcoíris de la sierra San Pedro Mártir: bionomía, ecología poblacional, hábitat y conservación. Tirant Lo Blanch, México.
- Ruiz-Campos, G., A. Varela-Romero, S. Sánchez-González, F. Camarena-Rosales, A. Maeda-Martínez, A. F. González-Acosta, A. Andreu-Soler, E. Campos-González, y J. Delgadillo-Rodríguez. (2014b). Peces invasores del noroeste de México. Pags. 375-399. En: Especies Acuáticas Invasoras en México (R. E. Mendoza-Alfaro y P. Kolef, eds.). CONABIO, México.
- Ruiz-Campos, G., Camarena-Rosales, F., Contreras-Balderas, S., Bernard, G. y De La Cruz Agüero, J. (2008). Evaluación ecológica y distribución de peces exóticos en las regiones hidrológicas de San Ignacio y La Purísima, Baja California Sur, y su impacto en las poblaciones del pez amenazado, *Fundulus lima*. Informe final, Proyecto SEMARNAT-CONACYT-2002-COI-173, México. 35 pp.
- Ruiz-Campos, G., Camarena-Rosales, F., González-Acosta, A. F., Maeda-Martínez, A. M., García de León, F. J., Varela-Romero, A. y Andreu-Soler, A. (2014a). Estatus actual de conservación de seis especies de peces dulceacuícolas de la península de Baja California, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85:1235-1248.
- Ruiz-Campos, G., Castro-Aguirre, J. L., Contreras-Balderas, S., Lozano-Vilano, M. L., González-Acosta, A. F. y Sánchez Gonzales, S. (2003). An annotated distributional checklist of the freshwater fishes from Baja California Sur, Mexico. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 12:143–155.

- Ruiz-Campos, G., Contreras-Balderas, A., Rodriguez-Meraz, M. y Valles-Ríos, M. E. (2004). Catálogo de especímenes recientes de aves de las sierras Juárez y San Pedro Mártir, e inmediaciones, noroeste de Baja California, México. *Cotinga*, 21:45-58.
- Ruiz-Campos, G., Contreras-Balderas, S., Lozano-Vilano, M. L., Gonzalez-Guzman, S. y Alaniz-Garcia, J. (2000). Ecological and distributional status of the continental fishes of Northwestern Baja California. *Bulletin of the Southern California Academy of Sciences*, 99:59-90.
- Ruiz-Campos, G., Pister, E. P. y Compeán-Jiménez, G. A. (1997). Age and growth of Nelson' s trout, *Oncorhynchus mykiss nelsoni*, from Arroyo San Rafael, Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. *The Southwestern Naturalist*, 42:74-85.
- Ruiz-Campos, G., Solís-Mendoza, M., Camarena-Rosales, F., Andreu-Soler, A. y Pister, E. P., Meza-Matty, I. A. (2021). Population density and habitat selection of San Pedro Mártir Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss nelsoni*) in mountain streams of northwestern Baja California, Mexico. *California Fish and Wildlife Journal*. (en prensa).
- Saunders, R. L. y Gee, J. H. (1964). Movements of young Atlantic salmon on a small stream. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 21:27-36
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1983). Informe geológico y geohidrológico de diversas zonas de Baja California. Mexicali: Subdirección de Planeación-Residencia Estatal.
- Secretaría de Economía (SE) (2012). NMX-AA-159-SCFI-2012, Norma que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de septiembre de 2012. México.
- Simonović, P., Tošić, A., Vassilev, M., Apostolou, A., Mrdak, D., Ristovska, M., Kostov, V., Nikolić, V., Skraba, D., Vilizzi, L. y Copp, G.H. (2013). Risk identification of

- non-native freshwater fishes in four countries of the Balkans Region using FISK. *Mediterranean Marine Science*, 14(2):369-376.
- Smeets, E. y Weterings, R. (1999). Environmental Indicators: Typology and Overview. Technical report, núm. 25, European Environment Agency (EEA), Copenhagen.
- Smith, A. K. (1973). Development and application of spawning velocity and depth criteria for Oregon salmonids. *Transactions of the American Fisheries Society*, 102:312-316.
- Smith, R. H. (1984). *Native trout of North America*. Portland: Frank Amato Publications.
- Smith, R. H. (1991). Rainbow trout, *O. m. nelsoni*. En Trout. J. Stolz and J. Schnell (eds.), *The Wildlife Series* (pp. 304-322). Pennsylvania: Stackpole Books.
- Snyder, J. O. (1926). The trout of the sierra San Pedro Mártir, Lower California. *University of California Publications in Zoology*, 21:419-426.
- Sokal, R. R. y Rohlf, F.J. (1981). *Biometry*. W. H. Freeman & Co., San Francisco. 219 pp.
- Solís-Mendoza, M. (2016). Caracterización del hábitat de la trucha arcoíris (*O. m. nelsoni*) en la sierra de San Pedro Mártir, Baja California, y su relación con la densidad y estructura poblacional. Tesis de Doctorado. Ciencias de la Vida-Biología Ambiental. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, México.
- Sorensen, J., McCreary, S. y Brandani, A. (1992). Arreglos Institucionales para Manejar Ambientes y Recursos Costeros. En *Costas*. Rhode Island: Coastal Resources Center.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., et al. IPCC. (2013). Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013.

- Svarstad, H., Petersen, Rothman, L. K., Siepel, D. y Wätzold, H. (2008). Discursive biases of the environmental research framework DPSIR. *Land Use Policy*, 25:116-125.
- Tamayo, J. L. (1962). *Geografía general de México: geografía física*. Tomo II. Instituto de Investigaciones Económicas. México. 648 pp.
- Tarkan, A. S., Ekmekci, F. G., Vilizzi, L. y Copp, G. H. (2013). Risk screening of non-native freshwater fishes at the frontier between Asia and Europe: first application in Turkey of the Fish Invasiveness Screening Kit (FISK). *Journal of Applied Ichthyology*, 1:1-7.
- Thorne, R. F, Moran, R. V. y Minnich, R. A. (2010). Vascular plants of the high sierra San Pedro Mártir, Baja California, Mexico: an annotated checklist. *Aliso*, 28:1-57.
- Turskis, Z., Kazimieras, E. y Peldschus, F. (2009). Multi-criteria Optimization System for Decision Making in Construction Design and Management. *Engineering Economics*, 1(61):7-17.
- United States Department of Agriculture-United States Forest Service (USDA-USFS) (1990). Pacific Southwest Region habitat typing field guide. Oregon, E.U.A.
- Utt, C. E. (1991). Cómo las truchas subieron a la sierra de San Pedro Mártir. Carta enviada al doctor Carl L. Hubbs, junio 15 de 1945. Traducida y presentada por Mike Wilken Robertson. En C. Lazcano (ed.), *Memoria III Semana de la Exploración y la Historia: sierra San Pedro Mártir* (pp. 36-38). Ensenada: Universidad Autónoma de Baja California.
- Van Nouhuys, S. (2009). Metapopulation Ecology. *Encyclopedia of Life Sciences (ELS)*, 9.
- Velázquez-Miranda, M., Ruiz-Campos, G., Fermán-Aldama, J. L., Delgadillo-Rodríguez, J. y Leyva-Aguilera, C. (2011). Índice de calidad ambiental aplicado

- en el Oasis de San Ignacio, Baja California Sur, México. *Investigación Ambiental Ciencias y Política Pública*, 3(1):30-38.
- Vila, J. S., Varga, D. L., Llausas, A. P. y Ribas, A. P. (2006). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). Una interpretación desde la geografía. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 48:151-166.
- Vilizzi, L. y Copp, G. H. (2012). Application of FISK, and Invasiveness Screening Tool for Non-Native Freshwater Fishes, in the Murray-Darling Basin (Southeastern Australia). *Risk Analysis*, 33:1432-1440.
- Villarreal-Zazueta, N. A. (2012). Análisis de la estructura genético poblacional de la trucha arcoíris de la sierra San Pedro Mártir, *O. m. nelsoni* (Evermann, 1908). Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada.
- Welsh, H. H., Jr. (1988). An ecogeographic analysis of the herpetofauna of the sierra de San Pedro Mártir region, Baja California, with a contribution to the biogeography 280 Bibliografía of the Baja California herpetofauna. *Proceedings of the California Academy of Science*, 46:1-72.
- Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R. y Wetnam, T. W. (2006). Warming and earlier spring increases western U.S. forest wildfire activity. *Science*, 313:940–943.
- Zoellick, B. W. y Cade, B. S. (2006). Evaluating redband trout habitat in sagebrush desert basins in southwestern Idaho. *North American Journal of Fisheries Management*, 26:268-281.
- Zúñiga-Castillo, W. R. (1995). Ordenamiento ambiental para el plan de manejo integral de la Cuenca del arroyo Santo Domingo, Baja California, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada.