



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

EVALUACIÓN ECOHIDROLÓGICA DE LA INVASIÓN POR CARRIZO (*Arundo donax* L.) EN EL RÍO CASILLAS – PILÓN, CUENCA DEL RÍO BRAVO – SAN JUAN, NORESTE DE MÉXICO

BERNARDO ANTONIO MARINO MALDONADO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE :

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2019

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Bernardo Antonio Marino Maldonado, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Evaluación ecohidrológica de la invasión por carrizo (ARUNDO DONAX L.) en el río Casillas-Pilón, cuenca del río Bravo-San Juan, noreste de México y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 31 de Enero de 2019



Firma del
Alumno (a)



Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: Evaluación Ecohidrológica de la Invasión por Carrizo (*Arundo donax* L.) en el Río Casillas-Pilón, Cuenca del Río Bravo-San Juan, Noreste de México, realizada por el alumno: Bernardo Antonio Marino Maldonado, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

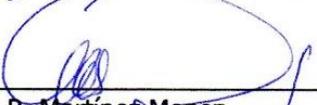
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



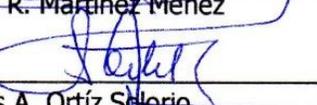
Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso

ASESOR



Dr. Mario R. Martínez Menez

ASESOR



Dr. Carlos A. Ortiz Selorio

ASESOR



M.C. Erasmo Rubio Granados

Montecillo, Texcoco, Estado de México, enero de 2019

EVALUACIÓN ECOHIDROLÓGICA DE LA INVASIÓN POR CARRIZO
(*Arundo donax* L.) EN EL RÍO CASILLAS-PILÓN, CUENCA DEL
RÍO BRAVO-SAN JUAN, NORESTE DE MÉXICO

Biól. Bernardo Marino Maldonado, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2019

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo la caracterización de la invasión por carrizo *Arundo donax*, especie exótica invasora, en las partes alta y media de la subcuenca del río Pílon en el estado de Nuevo León. Se determinó la extensión de la invasión y se estimó la influencia que en ella tienen factores hidrológicos y geomorfológicos determinados para el río Casillas-Pílon en el contexto de su clasificación tipológica fluvial siguiendo la Clasificación de Rosgen. Se encontró que el carrizo está establecido en gran parte de la longitud total del cauce, encontrándose particularmente desarrollado en colindancia con los principales núcleos poblacionales y productivos en la subcuenca. Con base en la Clasificación de Rosgen, el río Casillas-Pílon presenta 14 subtipos fluviales acotados a los tipos fluviales B, C, D y F. Se determinó que los subtipos fluviales tienen influencia sobre la incidencia de carrizo, siendo las variables *pendiente* y *substrato* aquellas con efecto significativo en la presencia de carrizo. Se encontró que aquellos subtipos fluviales con mayor efecto positivo sobre la presencia de carrizo (D3, D4b y C4) desarrollan una llanura aluvial y colindan con los principales núcleos poblacionales y productivos, por lo que es necesario explorar el peso que el posible factor de contaminación fluvial con nutrientes por parte de dichos núcleos pudieran estar teniendo como causales de la invasión por carrizo en el área de estudio, permitiendo así dilucidar con certeza el papel en causalidad que las variables hidrológicas y geomorfológicas medidas en el presente estudio tienen sobre la incidencia de carrizo.

Palabras clave: carrizo, *Arundo donax*, Clasificación de Rosgen, río Pílon, Sierra Madre Oriental, especies exóticas invasoras

ECOHYDROLOGIC ASSESSMENT OF GIANT REED (*Arundo donax* L.)
INVASION IN THE CASILLAS-PILÓN RIVER IN THE RÍO BRAVO-SAN JUAN
WATERSHED IN NORTHEASTERN MEXICO

Biól. Bernardo Marino Maldonado, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2019

ABSTRACT

Invasion by giant reed *Arundo donax* L. was assessed in the upper and mid *Río Pilon* watershed in the state of Nuevo Leon in Mexico, registering its extension and analyzing influence by the hydrologic and fluvial geomorphic factors used as criteria for the Rosgen Classification applied to the *Pilon* river as part of this work. Giant reed was found to be established throughout great percentage of the total river length, being particularly developed along the main rural habitational and agricultural sites in the watershed. Results of the Rosgen Classification show presence of 14 stream sub-types of the B, C, D and F types in the *Pilon* river. Influence by stream sub-type on presence/absence of giant reed was found, and slope and bed material as variables showed significant effect over giant reed presence. Stream sub-types with higher positive effect over giant reed presence (D3, D4b and C4) characteristically have an alluvial plain and were found to be located along the main rural habitational and agricultural sites in the watershed. Further study exploring the possible influence in the study area by nutrient enrichment of river and alluvial plains from point and non-point source pollution from these urban and agricultural sites is needed in order to clearly ascertain whether the hydrologic and geomorphic variables tested have a causal role over giant reed's presence in the *Río Pilon* watershed.

Keywords: giant reed, *Arundo donax*, Rosgen Classification, *Río Pilon*, Sierra Madre Oriental, invasive species

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados que a través de su personal académico y administrativo siempre me brindó una excelente atención, dedicación y disposición de servicio como estudiante.

Al Dr. Mario R. Martínez Menez y al M.C. José Donald Ríos Berber, quienes fueron clave para mi decisión de ingreso al Postgrado en Hidrociencias, permitiéndome participar en el año 2015 como oyente externo en uno de sus cursos y compartiéndome información sobre su línea de investigación. Así mismo a los profesores Dr. Carlos A. Ortiz Solorio y Dr. Armando Gómez Guerrero quienes me brindaron igualmente apoyo clave para mi decisión de ingreso al Colegio de Postgraduados.

Al Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso, quien fungió cabalmente en su responsabilidad como consejero de mi trabajo de tesis, mostrando siempre la mejor disposición y paciencia para ayudarme a concretar un proyecto de investigación plenamente satisfactorio.

A las secretarias Mariela Hernández Jiménez y Patricia Ibarra Alonso, quienes me brindaron constantemente una atención impecable y agradable, siendo un apoyo invaluable en cuestiones de trámites oficiales.

A mis compañeros de estudio y en particular a Ana Arcos Hernández, por su insustituible apoyo en mi trabajo de campo y durante la mitad final de mis estudios de maestría.

A mis queridos padres, a quienes siempre tendré profundo agradecimiento por haberme dado las herramientas de vida para construir mi felicidad.

DEDICATORIA

A la Gran Sierra Plegada,
con profundo respeto y devoción a la vida y entidades
que en ella habitan.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | iv |
| ABSTRACT | v |
| LISTA DE CUADROS | ix |
| LISTA DE FIGURAS | x |
| 1.- INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 4 |
| 3.- OBJETIVOS..... | 6 |
| 4.- HIPÓTESIS..... | 7 |
| 5.- ANTECEDENTES..... | 8 |
| 5.1.- Los ecosistemas fluviales y su importancia..... | 8 |
| 5.2.- El sistema fluvial – ripario | 9 |
| 5.3.- Los ecosistemas fluviales y riparios en riesgo..... | 11 |
| 5.4.- Las especies exóticas invasoras (EEI) y el carrizo (Arundo donax) | 14 |
| 5.5.- Efectos de la invasión por carrizo sobre el sistema fluvial – ripario | 17 |
| 5.6.- Afectaciones socioeconómicas de la invasión por carrizo..... | 22 |
| 5.7.- Factores que influyen al establecimiento del carrizo | 23 |
| 5.8.- Antecedentes científicos sobre la subcuenca del río Pílon..... | 26 |
| 5.9.- Clasificación geomorfológica fluvial de Rosgen | 28 |
| 6.- MATERIALES Y MÉTODOS | 30 |
| 6.1.- Área de estudio | 30 |
| 6.2.- Metodología | 48 |
| 6.3.- Materiales | 68 |
| 7.- RESULTADOS | 69 |
| 7.1.- Ubicación y extensión del carrizo en la subcuenca | 69 |
| 7.2.- Caracterización hidrológica y geomorfológica del río Casillas-Pílon | 71 |
| 7.3.- Análisis estadístico | 75 |
| 8.- DISCUSIÓN..... | 79 |
| 8.1.- Invasión por carrizo en el área de estudio | 79 |
| 8.2.- Clasificación tipológica fluvial del río Casillas-Pílon..... | 80 |
| 8.3.- Relación entre los tipos fluviales y el carrizo en el área de estudio | 81 |
| 9.- CONCLUSIONES | 84 |
| 10.- LITERATURA CITADA | 86 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Tipos de clima en la subcuenca del río Pílon y su descripción | 37 |
| Cuadro 2. Datos normales de precipitación (mm) y temperatura (°C) registrados por las estaciones meteorológicas correspondientes a la parte alta de la subcuenca del río Pílon... | 38 |
| Cuadro 3. Datos normales de precipitación (mm) y temperatura (°C) registrados por las estaciones meteorológicas correspondientes a la parte media de la subcuenca del río Pílon | 39 |
| Cuadro 4. Datos normales de precipitación (mm) y temperatura (°C) registrados por las estaciones meteorológicas correspondientes a la parte baja de la subcuenca del río Pílon.. | 40 |
| Cuadro 5. Uso de suelo y vegetación en la subcuenca del río Pílon | 41 |
| Cuadro 6. Niveles jerárquicos de la Clasificación de Rosgen. Tomado de Rosgen (1994). | 49 |
| Cuadro 7. Tipos de valle según Rosgen. Información de Endreny (2003) y EPA (2018).. | 53 |
| Cuadro 8. Tipos de tramos fluviales según Rosgen. Información de Endreny (2003) y EPA (2018). | 55 |
| Cuadro 9. Clases de sustrato (Wentworth, 1922) empleadas para la Clasificación de Rosgen | 64 |
| Cuadro 10. Tipos fluviales y valores de variables determinados para el Nivel I de clasificación | 71 |
| Cuadro 11. Clasificación fluvial y variables determinadas por segmento fluvial para el Nivel II de clasificación..... | 72 |
| Cuadro 12. Resultado de la prueba de Wald: significancia de la variable independiente STFLUV (subtipo fluvial) sobre la variable dependiente CARRIZO | 76 |
| Cuadro 13. Estimadores calculados para los subtipos fluviales..... | 76 |
| Cuadro 14. Probabilidades de presencia/ausencia de carrizo por subtipo fluvial | 77 |
| Cuadro 15. Comparación de cocientes de disparidad y límites de confianza para las variables usadas en la Clasificación de Rosgen | 78 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Ubicación de la subcuenca del río Pílon en los estados de Nuevo León y Coahuila. Se muestran las corrientes principales y los municipios abarcados. | 30 |
| Figura 2. Contexto fisiográfico de la subcuenca del río Pílon | 31 |
| Figura 3. Muestra de la diversidad ambiental en la subcuenca del río Pílon | 33 |
| Figura 4. Formaciones geológicas en la subcuenca del río Pílon..... | 34 |
| Figura 5. Tipos de suelo en la subcuenca del río Pílon | 35 |
| Figura 6. Tipos de clima en la subcuenca del río Pílon..... | 36 |
| Figura 7. Climogramas correspondientes a la parte alta de la subcuenca del río Pílon | 38 |
| Figura 8. Climogramas correspondientes a la parte media de la subcuenca del río Pílon .. | 39 |
| Figura 9. Climogramas correspondientes a la parte baja de la subcuenca del río Pílon..... | 40 |
| Figura 10. Uso de suelo y vegetación en la subcuenca del río Pílon | 42 |
| Figura 11. Porcentajes de cobertura territorial de los distintos tipos de uso de suelo en la subcuenca del río Pílon. Incluye la vegetación secundaria dentro de cada tipo de vegetación. | 43 |
| Figura 12. Sitios prioritarios acuáticos epicontinentales (polígonos pequeños) y sitios prioritarios terrestres para la conservación de la biodiversidad (polígonos grandes)..... | 44 |
| Figura 13. Toponimia fluvial de la subcuenca del río Pílon (tomado de Sánchez, 1987)... | 45 |
| Figura 14. Red fluvial de la subcuenca del río Pílon..... | 46 |
| Figura 15. Cobertura de servicios (izquierda) y rasgos de producción y empleo (derecha) en los municipios de la subcuenca del río Pílon (tomado de Antonio-Némiga et al., 2006) | 47 |
| Figura 16. Unidad de estudio marcada en azul..... | 51 |
| Figura 17. Perfiles longitudinal, transversal y vertical correspondientes a tipos de tramos fluviales caracterizables en el Nivel I. Tomado de Rosgen (1994). | 52 |
| Figura 18. Ejemplo de trazado de perfiles transversales (líneas amarillas) en los puntos medios de los segmentos fluviales, a escala de paisaje, para la determinación de tipos de valle | 53 |
| Figura 19. Ejemplo de determinación de variables para el Nivel I de la Clasificación de Rosgen | 57 |
| Figura 20. Variables para la clasificación de tipos fluviales a Nivel II. Tomado de Endreny (2003). | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 21. Ejemplo de trazado de perfiles transversales (líneas rojas) en los puntos medios de los segmentos fluviales, a escala de cauce, para la caracterización de variables | 59 |
| Figura 22. Ejemplo de trazado de perfil transversal a nivel de cauce con la herramienta Terrain Profile de QGIS 3.2.0 | 59 |
| Figura 23. Ejemplo de determinación de variables hidrológicas y geomorfológicas del segmento fluvial en el perfil transversal construido a nivel de cauce | 60 |
| Figura 24. Criterio geométrico para estimar el nivel de caudal bankfull | 61 |
| Figura 25. Ejemplo de división del ancho de cauce a nivel de caudal bankfull en 10 segmentos iguales para la medición de profundidades y estimación de la profundidad promedio..... | 62 |
| Figura 26. Ejemplo del trazado de puntos necesarios para la estimación del índice de sinuosidad..... | 62 |
| Figura 27. Muestreo de substrato de lecho mediante visualización directa con el muestreador | 63 |
| Figura 28. Ejemplo de medición del diámetro intermedio de partículas del substrato | 64 |
| Figura 29. Puntos de ubicación del carrizo registrados para las partes alta y media de la subcuenca del río Pílon..... | 69 |
| Figura 30. Fotografías ilustrativas del carrizo establecido a lo largo de la unidad de estudio | 70 |
| Figura 31. Frecuencias absolutas de tipos fluviales en la unidad de estudio | 74 |
| Figura 32. Frecuencias absolutas de subtipos fluviales en la unidad de estudio..... | 74 |
| Figura 33. Comparación de frecuencias relativas de tipos fluviales y carrizo por tipo fluvial | 75 |
| Figura 34. Comparación de frecuencias relativas de subtipos fluviales y carrizo por subtipo fluvial..... | 75 |
| Figura 35. Probabilidades estimadas de presencia/ausencia de carrizo por subtipo fluvial | 77 |

1.- INTRODUCCIÓN

Actualmente, la humanidad se enfrenta a una grave y compleja problemática que no sólo obstaculiza la persistencia continuada de los modelos de desarrollo vigentes, sino que establece además un riesgo muy real para la continuación de la civilización moderna. Si bien integrada por múltiples vertientes, es el aspecto medioambiental el eje fundamental de esta problemática, y aquél mediante el cual todas las demás vertientes se conjugan.

La explotación insustentable de los ecosistemas y sus recursos naturales, llevada a cabo de manera intensa a partir de la Revolución Industrial a finales del siglo XVIII, y magnificada exponencialmente a partir del siglo pasado, ha resultado en una grave alteración de los sistemas naturales cuya funcionalidad es indispensable para la supervivencia a largo plazo de las sociedades humanas.

En el escenario demográfico futuro que estima una cifra poblacional de 9 mil millones de humanos para el año 2050, se agudizarán intensamente los principales problemas que las naciones ya actualmente enfrentan: producción de alimentos y provisión de agua potable suficientes, en el contexto de una declinación cada vez mayor de los ecosistemas y los recursos naturales necesarios para ello, y teniendo de trasfondo la persistente batalla para la erradicación de la pobreza.

En este contexto, el agua tiene una relevancia de gran importancia, al ser un recurso crucial para las necesidades básicas de supervivencia humana, y al fungir como un insumo indispensable para la agricultura, la ganadería y la industria en general. De suma gravedad, por lo tanto, es el hecho de que los ecosistemas que son clave en la provisión de agua estén sufriendo fuertes impactos y degradación: los ecosistemas acuáticos, por ejemplo, son aquellos que más fuertemente se encuentran degradados por las actividades humanas (Allan y Castillo, 2007; Sarukhán, 2009; BID, 2015). Esto es resultado tanto de la alteración directa de los cuerpos de agua, tales como ríos, lagos y humedales y sus componentes asociados, como de la alteración de las cuencas hidrográficas en que ocurren procesos fundamentales del ciclo hidrológico.

Los ríos son uno de los elementos de la naturaleza que mayor fuente de bienestar y sustento representan para la humanidad, por la diversidad y relevancia de los servicios ambientales que proveen a la sociedad. Parte fundamental de los ríos es la vegetación riparia establecida a lo largo de los márgenes de los cauces y en las llanuras de inundación, distinta ecológicamente a otros tipos de vegetación por su composición, estructura y funcionalidad. En conjunto, los ríos y sus sistemas riparios proveen numerosos recursos y servicios ambientales, entre los cuales y por mencionar sólo unos cuantos, están la provisión de agua limpia y alimento, la recarga de acuíferos, la fertilización de zonas agrícolas adyacentes y aguas abajo, el soporte de ciclos biogeoquímicos, el tratamiento natural de desechos y contaminantes, la mitigación de inundaciones, el soporte de biodiversidad y el mantenimiento de climas adecuados (Malanson, 1993; Forslund *et al.*, 2009; Capon *et al.*, 2013).

A pesar de su enorme importancia, la mayoría de los ríos del planeta se encuentran degradados en mayor o menor medida, al ser uno de los componentes de las cuencas que más fuertemente se ven afectados por la influencia de las actividades humanas sobre aquellas y al sufrir además de forma directa multitud de impactos. Por largo tiempo, el humano se ha empeñado en manipular los ríos y otros cuerpos de agua para sus fines utilitarios: extracción de agua para consumo doméstico, agrícola e industrial; modificación del caudal para abastecimiento de agua y generación de energía; alteración de cauces para mitigación de eventos de inundación y explotación agrícola y urbana de las llanuras a lo largo de las riberas y en los deltas; transportación; y vertedero de desechos (Allan y Castillo, 2007).

Como resultado de esto, los ecosistemas acuáticos continentales se cuentan entre aquellos más deteriorados a nivel mundial, lo cual se refleja además en que los grupos biológicos con la más alta tasa de extinción a nivel mundial son aquellos conformados por invertebrados acuáticos, peces de agua dulce, y anfibios (*ibid*). En México, son los peces de agua dulce el grupo biológico con la más alta tasa de extinción (Sarukhán *et al.*, 2009).

Si bien son múltiples los factores antrópicos responsables del disturbio y alteración ecológica, entre aquellos que más daño han causado y siguen causando está la introducción de especies exóticas invasoras a ambientes naturales (Ceballos *et al.*, 2015). Se les llama especies exóticas a aquellas que se encuentran establecidas fuera de la región geográfica particular a la que pertenecen. No todas las especies exóticas son invasoras; lo son aquellas que, por sus características biológicas y ecofisiológicas particulares, aventajan en capacidad adaptativa a las especies nativas y alteran al ecosistema hospedero, provocando la pérdida de biodiversidad y con esto la estructura funcional de los ecosistemas y los servicios ambientales que éstos proporcionan.

Considerada entre las 100 especies exóticas invasoras más peligrosas (Lowe *et al.*, 2000), el carrizo *Arundo donax* es una planta freatófita originaria de Asia y el Mediterráneo que desde el siglo antepasado fue introducida al continente americano. Se establece preferentemente a lo largo de ríos y otros cuerpos de agua, en donde ocasiona afectaciones graves a la biodiversidad nativa y a los ecosistemas fluviales mediante el desplazamiento de la vegetación riparia y la alteración de los procesos hidrológicos y geomorfológicos fluviales, poniendo en riesgo la continuidad de los servicios ambientales proporcionados por el río (McGaugh *et al.*, 2006; Coffman, 2007; Lambert *et al.*, 2010). Una vez establecida ampliamente, los costos para su control y erradicación son muy elevados, como ha sido demostrado ya en lugares como California, EEUU, en donde hasta el año 2011 se habían invertido más de 70 millones de dólares en un lapso de 15 años, sin lograr aún su erradicación efectiva (CIPC, 2011).

Reconociendo que los servicios ambientales que los ríos proveen a la sociedad humana son de una importancia altísima, más aún en el contexto del cambio climático, se entiende la necesidad urgente por rectificar la gestión actual de los mismos hacia un modelo integral de sustentabilidad. Esto incluye, entre muchas otras acciones, el control y erradicación de especies exóticas invasoras con fines de preservar y/o restaurar la funcionalidad original ecológica y asegurar así la integridad de los servicios ecosistémicos fluviales.

2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El río Casillas – Pilón, ubicado en el centro-sur del estado de Nuevo León, es un afluente del río San Juan, uno de los ríos más caudalosos del estado y tributario del río Bravo.

Al ser uno de los afluentes principales del río San Juan, el río Casillas – Pilón aporta a través de éste un caudal considerable a la Presa Solidaridad (El Cuchillo), principal obra de almacenamiento para el abastecimiento de agua al área metropolitana de Monterrey para uso urbano e industrial, así como para uso agrícola para los distritos de riego 031 “Las Lajas” en Nuevo León y 026 “Bajo Río San Juan” en Tamaulipas (ITESM, 2009; IAENL, 2011).

Su importancia económica radica además en el hecho de ser la principal fuente de agua para la Región Citrícola en el centro del estado de Nuevo León, la cual está integrada por seis municipios cuya actividad agrícola se centra en los cultivos de cítricos, producción que posiciona a Nuevo León en el quinto lugar a escala nacional (López-López *et al.*, 2014).

Por otro lado, el río aporta la totalidad del agua que sustenta a las comunidades poblacionales en las partes media y alta de su cuenca, en donde su uso principal es en la irrigación de las huertas nogaleras del municipio de Rayones, principal productor de nuez del estado y cuya producción es comercializada a nivel estatal, nacional e internacional.

Además del servicio ambiental de provisión de agua recién mencionado, indispensable para la economía y subsistencia poblacional tanto del área metropolitana de Monterrey como del municipio de Rayones y los de la Región Citrícola, el río Casillas – Pilón proporciona una gran diversidad de servicios ecosistémicos que sustentan directa e indirectamente a la estabilidad económica y al bienestar poblacional en la región.

Todas estas consideraciones contextualizan la relevancia de conservar la integridad y funcionalidad ecosistémicas de este importante río y su cuenca hidrográfica.

Es por lo tanto motivo de alarma la presencia del carrizo *Arundo donax* a lo largo del cauce del río y en otras zonas de su cuenca. Esta especie ha sido observada invadiendo discontinuamente gran parte de la longitud del río Casillas – Pílon en la parte media y alta de su cuenca. Los antecedentes, en Norteamérica y otras regiones del mundo, que demuestran los graves daños que el carrizo ocasiona a los ecosistemas terrestres y acuáticos al establecerse invasivamente en ellos, proporcionan una razón contundente para atender cuanto antes esta problemática.

Más aún, las observaciones preliminares hechas en campo en el área de estudio permiten suponer que la invasión se encuentra aún en un grado intermedio de intensidad, por lo que es urgente realizar una evaluación formal de la misma para contar con una base diagnóstica que permita la formulación de una estrategia de manejo para su control y erradicación efectivos antes de que el problema incremente en magnitud, reduciendo las posibilidades de éxito de dichas acciones y elevando su costo económico.

3.- OBJETIVOS

Objetivo general

Caracterizar ecohidrológicamente la invasión por carrizo *Arundo donax* en las partes alta y media de la subcuenca del río Pílon, estimando la extensión de invasión y determinando la influencia que factores hidrológicos y geomorfológicos tienen en la distribución del carrizo.

Objetivos específicos

- Caracterizar la invasión por carrizo en extensión en las partes alta y media de la subcuenca del río Pílon
- Clasificar tipológicamente con base en la Clasificación de Rosgen los tramos fluviales del río Casillas-Pílon
- Determinar la influencia de factores hidrológicos y geomorfológicos fluviales en la distribución del carrizo en el área de estudio

4.- HIPÓTESIS

Existen factores hidrológicos y geomorfológicos fluviales específicos que propician el establecimiento del carrizo.

5.- ANTECEDENTES

5.1.- *Los ecosistemas fluviales y su importancia*

Los ecosistemas acuáticos asociados a los ríos, lagos y humedales son de relevante importancia para la sociedad, al ser proveedores de una amplia gama de servicios ambientales que en muchos casos determinan y en general contribuyen al sustento de la economía y el bienestar humanos (Brierley y Fryirs, 2005; Forslund *et al.*, 2009; Matthews, 2016).

Los servicios ambientales o ecosistémicos son los productos, funciones y procesos derivados de los ecosistemas o llevados a cabo por éstos y que representan el fundamento de la subsistencia y bienestar de las sociedades humanas (FAO, 2018). Dichos servicios, que conceptualmente fueron por primera vez impulsados políticamente a nivel internacional a través de la Evaluación del Milenio de los Ecosistemas (UNEP, 2005), son clasificados como servicios de provisión, de regulación, de soporte y culturales.

- Los servicios de provisión consisten en productos o insumos obtenibles de los ecosistemas y aprovechables directamente, tales como agua, alimento, suelo cultivable, materias primas para la industria, y fuentes energéticas.
- Los servicios de regulación son las funciones de los ecosistemas que resultan de sus propios procesos internos y de la interacción con otros ecosistemas: la regulación y mantenimiento del clima; la disponibilidad de agua superficial y subterránea; el control biológico de plagas agrícolas y vectores de enfermedades; la mitigación de eventos meteorológicos extraordinarios y desastres naturales; el procesamiento natural de contaminantes; la absorción y almacenamiento de carbono.
- Los servicios de soporte son la base material y funcional que los ecosistemas y sus elementos en conjunto proveen para la funcionalidad y persistencia de los mismos ecosistemas y sus servicios ambientales: los ciclos biogeoquímicos; el ciclo

hidrológico; la formación de suelos; la producción primaria; la polinización de cultivos agrícolas; el mantenimiento de la biodiversidad y los recursos genéticos.

- Los servicios culturales se derivan de la importancia estética, recreativa, espiritual y cultural ligadas de forma intrínseca a la presencia de los ecosistemas y sus elementos y funciones, y que sustentan modos de vida y tradiciones culturales y espirituales, la salud emocional y física de las personas, y las prácticas recreativas y turísticas.

Adicionalmente a los beneficios que la sociedad obtiene de los ríos como resultado de la manipulación y modificación de éstos y sus caudales, los ríos y sus ecosistemas asociados proporcionan de forma natural una gama de servicios ambientales que son indispensables para la sociedad, entre los cuales están la provisión de agua limpia, alimento, y materia prima (servicios de provisión), la purificación del agua, el procesamiento de contaminantes, la regulación climática, la mitigación de inundaciones y el control de vectores de enfermedades (servicios de regulación), el soporte de ciclos biogeoquímicos, la fertilización de suelos y la polinización de cultivos, y el mantenimiento de biodiversidad (servicios de soporte), así como la disponibilidad de espacios recreativos y espirituales (servicios culturales) (Forslund *et al.*, 2009).

5.2.- El sistema fluvial – ripario

Parte fundamental de los ríos es el ambiente ripario, extensión territorial adyacente al cauce y cuyo rasgo fundamental es la vegetación riparia que lo conforma. Ésta se diferencia marcadamente de otro tipo de comunidades vegetacionales por sus características estructurales, composicionales y funcionales que son reflejo de su carácter ecotonal entre ambientes acuáticos y terrestres, lo que le confiere una alta biodiversidad y una amplia gama de procesos ecológicos que resultan en la provisión de bienes y servicios ambientales en una magnitud desproporcionalmente abundante en relación con su área superficial y en comparación con cualquier otro tipo de ecosistema (Capon *et al.*, 2013).

Esta extraordinaria capacidad funcional de los ecosistemas riparios se deriva de su alto grado de conectividad espacial que permite el intercambio de materia, energía y biodiversidad a escalas territoriales tanto locales como regionales, ejerciendo una influencia marcada sobre procesos y componentes físicos, químicos y biológicos no sólo en la interfase río-márgenes, sino abarcando también territorio de la cuenca aguas arriba, territorio adyacente a variable distancia y, ultimadamente, territorios lejanos aguas abajo incluyendo finalmente los ecosistemas costeros y oceánicos (*ibid.*; Kominoski *et al.*, 2013). A esto se le describe como la conectividad longitudinal, lateral y vertical de los ecosistemas fluviales y riparios.

El río y su ambiente ripario están estrechamente interrelacionados y son interdependientes ecológicamente en flujos de materia, energía y biodiversidad (Malanson, 1993; Allan y Castillo, 2007). Las fuertes conexiones entre el caudal, las llanuras de inundación, el flujo de agua subterránea y la fluctuación del manto freático median el intercambio de organismos, materia, energía y sustancias disueltas que ocurre a lo largo de las dimensiones longitudinales, transversales, verticales y temporales de un río (Richter *et al.*, 1997).

El fenómeno fundamental que da forma a este sistema integrado fluvial-ripario y que rige su funcionamiento es la dinámica geomorfológica fluvial. El ambiente ripario es un ecosistema definido esencialmente por una dinámica de disturbio bajo forma de inundaciones y sus efectos, mismas que dirigen el desarrollo estructural y composicional y el funcionamiento del ambiente ripario (Malanson, 1993).

Por ende, el elemento fundamental para el mantenimiento de los servicios ambientales derivados del río y su ambiente ripario es el régimen natural hidrológico (Forslund *et al.*, 2009). Éste refleja la variabilidad natural del caudal de los ríos a lo largo del tiempo, en un rango temporal que abarca desde horas hasta siglos con un patrón claramente cíclico y específico para cada río, y que es resultado de la variabilidad en la intensidad, tiempo y duración de la precipitación, y en los efectos de la topografía del terreno, los tipos de suelo y de vegetación sobre los procesos de infiltración y escorrentía en la cuenca hidrográfica (Poff *et al.*, 1997).

La dinámica fluvial ligada a este régimen hidrológico natural resulta en la conformación de toda la gama de hábitats tanto acuáticos como riparios del sistema fluvial: la estructura física ambiental del río y los hábitats que determina son resultado de procesos físicos dinámicos y variables, en particular el movimiento de agua y sedimentos a lo largo del mismo cauce y entre el cauce, la ribera y la llanura de inundación, y cuya dinámica está estrechamente relacionada con el régimen natural hidrológico (Brierley y Fryirs, 2005). De tal forma, en un mismo río, diferentes condiciones de hábitat son creadas y mantenidas por un amplio régimen de caudales, de tal manera que a lo largo del tiempo, en un río pueden coexistir, o existir secuencialmente, hábitats efemerales, estacionales y/o persistentes asociados a condiciones de flujo libre, estancamiento o ausente.

A esta diversidad de hábitats fluviales y riparios está vinculada la evolución de especies adaptadas a ellos y a la variabilidad hidrológica subyacente: estas especies requieren, para completar su ciclo de vida, la disponibilidad de esta variedad en condiciones de hábitat, mantenida y regulada por el régimen de caudales (Poff *et al.*, 1997). De ello ha surgido el concepto de caudal ecológico, el cual es la cantidad, calidad y temporalidad de caudales requeridos en un río para mantener los componentes, funciones, procesos y resiliencia de los ecosistemas fluviales y riparios (SEMARNAT, 2014).

5.3.- Los ecosistemas fluviales y riparios en riesgo

Los ecosistemas acuáticos en ríos y otros cuerpos de agua continentales albergan en conjunto más de 126 mil especies de fauna, entre las que se cuentan más de 10 mil especies de peces y más de 90 mil especies de invertebrados que incluyen insectos, crustáceos, moluscos, nematodos, y muchos otros grupos taxonómicos que forman parte esencial de la estructura funcional ecológica acuática (Allan y Castillo, 2007; Matthews, 2016).

La vegetación riparia en particular es un espacio indispensable para la biodiversidad, al brindar hábitats permanentes y temporales con alimentos, agua y refugio, así como sitios de reproducción y crianza, para prácticamente todos los grupos de fauna continental: peces,

aves, mamíferos, anfibios y reptiles, así como invertebrados. A su vez, el ambiente ripario es usado por la fauna como un corredor de movilidad, indispensable para la dispersión de individuos y la difusión de especies. Por otra parte, la biodiversidad acuática depende del ambiente ripario para los flujos de materia que sustentan parte fundamental de la red trófica acuática y de la creación de hábitats acuáticos.

Se ha demostrado por ejemplo cómo hasta el 80% de los vertebrados en Arizona y Nuevo México, EEUU dependen del ambiente ripario durante por lo menos la mitad de su ciclo de vida, y más del 50 % son dependientes totalmente de él (Chaney *et al.*, 1990 en DeBano *et al.*, 2003).

La avifauna es particularmente dependiente del ambiente ripario, al encontrar en éste sitios de alimentación, refugio y anidación, así como hábitats temporales durante migraciones. Se ha demostrado cómo la riqueza específica de aves es mayor en bosques riparios que en otros territorios de una cuenca (Decamps *et al.*, 1987 en Malanson, 1993), de lo que se comprende la declinación de poblaciones de aves consecuente a la declinación en superficie de ambientes riparios (Burdick *et al.*, 1989 en Malanson, 1993).

Lamentablemente, los ecosistemas acuáticos continentales están entre los ecosistemas más deteriorados a nivel mundial, por lo que la biodiversidad que albergan es aquella más amenazada a nivel biosférico (Lambert *et al.*, 2010).

Master *et al.* (1998) demostraron que son las especies de ecosistemas dulceacuícolas aquellas bajo mayor grado de amenaza en Norteamérica. Adicionalmente, estimaciones de tasas futuras de extinción denotan una tasa cinco veces mayor para fauna acuática continental que para fauna terrestre en Norteamérica (Ricciardi y Rasmussen, 1999). En México, son los peces de agua dulce el grupo biológico con la más alta tasa de extinción, ya que de 500 especies registradas y que representan el 60 % de especies de Norteamérica, 127 se han extinto, 75 de las cuales eran especies endémicas, y 139 se encuentran en peligro de extinción (Sarukhán *et al.*, 2009).

Este estado de degradación ambiental se debe a la multitud de impactos que el manejo histórico y actual de los ríos y sus cuencas por parte del humano ha infligido y continúa infligiendo a estos ecosistemas, a través de la manipulación directa e indirecta de todos los elementos de los ríos: cauce, llanura de inundación, ambiente ripario y el territorio de sus cuencas.

Los principales factores antrópicos que ponen en riesgo la integridad de los ecosistemas fluviales y riparios son: a) la alteración directa de la geomorfología de los ríos y sus elementos, por medio de obras de canalización, rectificación, represamiento y/o minería de cauces, así como la transformación y/o invasión de las llanuras de inundación y de los ambientes riparios; b) la alteración indirecta de la dinámica geomorfológica fluvial mediante la alteración del régimen hidrológico natural de un río, por medio de represamientos y/o sobreextracción de agua; c) la contaminación por fuentes puntuales y no puntuales, con sedimentos, agroquímicos, desechos industriales, urbanos, domésticos y/o sanitarios; d) la introducción de especies exóticas invasoras; e) el cambio climático (Allan y Castillo, 2007).

Todos estos factores tienen complejos efectos en cadena que resultan ultimadamente en la pérdida de biodiversidad tras la alteración estructural y funcional de los ecosistemas. Concomitantemente, esto lleva a la pérdida de los servicios ambientales.

Se estima que a nivel mundial existen más de 45 mil represas con una cortina mayor a los 15 m en altura, y más de 1 millón de represas de menor tamaño. Contados son los ríos del mundo que no se encuentran fragmentados en su continuidad y/o alterados en su caudal ecológico a raíz de este tipo de obras (*ibid.*). Un estimado de más del 90 % del territorio de llanuras de inundación en Norteamérica y Europa se encuentra transformado a uso agropecuario o urbano (Tockner y Stanford, 2002). Solamente en EEUU para el inicio de la década de los 80's se estimaba una pérdida de hasta el 70% de los ambientes riparios (Brinson *et al.*, 1981 en Malanson, 1993).

5.4.- Las especies exóticas invasoras (EEI) y el carrizo (*Arundo donax*)

Los ecosistemas acuáticos continentales están entre los ecosistemas con mayor grado de invasión por especies exóticas invasoras (Coffman, 2007), las cuales son a nivel mundial una de las principales causas de pérdida de biodiversidad (Ceballos *et al.*, 2015; Koleff, 2017).

Se les llama especies exóticas a aquellas que se encuentran establecidas fuera de la región geográfica particular a la que pertenecen. No todas las especies exóticas son invasoras; lo son aquellas que, por sus características biológicas y ecofisiológicas particulares, aventajan en capacidad adaptativa a las especies nativas y alteran al ecosistema hospedero, provocando la pérdida de biodiversidad y consecuentemente de la estructura funcional de los ecosistemas y los servicios ambientales que éstos proporcionan.

Fundamentalmente, el problema de invasión por especies exóticas resulta por un lado de la anulación de las barreras biogeográficas existentes a la dispersión de individuos como consecuencia de la intensificación y expansión del comercio y conectividad general global, y por otro lado del aumento de la vulnerabilidad de hábitats a las invasiones, como consecuencia de la degradación ambiental antropogénica (Koleff, 2017).

La mayor amenaza presente para la conservación de los ambientes riparios aún supervivientes y los cuerpos de agua asociados a ellos son las especies exóticas invasoras. Entre éstas se encuentra el carrizo *Arundo donax* L., considerado entre las cien EEI más peligrosas (Lowe *et al.*, 2000).

El carrizo es una planta gramínea originaria de Asia y el Mediterráneo, introducida intencionalmente desde el siglo antepasado a Norteamérica con fines de control de erosión en cauces, construcción, barreras rompevientos y ornamentación, así como fabricación de instrumentos musicales (Mariani *et al.*, 2010; Lambert *et al.*, 2010). Su expansión territorial ha ocurrido principalmente en los últimos 45 años. Desde entonces, en EEUU *A. donax* ha colonizado en mayor o menor medida prácticamente todos los ambientes riparios en una amplia franja territorial que abarca todos los estados de la frontera sur, de oeste a este desde

California hasta Maryland; el problema es particularmente grave en California y a lo largo del Río Grande ó Bravo en Nuevo México y Texas (Lambert *et al.*, 2010). Actualmente, el carrizo se encuentra establecido como especie exótica invasora en más de 50 países en el mundo, incluyendo México (GISD, 2015).

El carrizo es una planta hidrófita y freatófita que se establece preferentemente a lo largo de los márgenes de cauces de ríos y otros cuerpos de agua, siendo capaz de desarrollarse aun estando parcialmente sumergida. A pesar de esta característica, el carrizo es tolerante a la sequía, pudiendo desarrollarse también bajo condiciones de sequía prolongada (Lambert *et al.*, 2010; CIPC, 2011).

La planta está conformada por una parte aérea o superficial y una parte subterránea. La parte aérea de la planta (denominada “caña”) consiste en un tallo principal recto y hueco, que alcanza una altura de hasta 10 m, un diámetro de hasta 24 mm, y un grosor de hasta 7 mm, dividido por particiones en los nodos de crecimiento, de los que a partir del segundo año de desarrollo emergen ramificaciones de menor diámetro, que a su vez pueden ramificarse ulteriormente. Tanto el tallo principal como las ramificaciones dan nacimiento a las hojas, que crecen hasta un largo de 61 cm y presentan una anchura basal de hasta 8 cm; la densidad mayor de hojas está concentrada en las ramificaciones. Del ápice del tallo se desarrollan entre Marzo y Septiembre panículos florales de hasta 60 cm de largo. La parte subterránea de la planta consiste de un sistema de rizomas ubicado a una profundidad promedio de 5-15 cm y máxima de 50 cm, el cual se desarrolla ramificándose de forma principalmente horizontal y da nacimiento a cañas y raíces; éstas alcanzan una longitud de hasta 1 m (CIPC, 2011).

Si bien el carrizo desarrolla floración, las observaciones realizadas en Norteamérica y en otras regiones geográficas denotan la inviabilidad de sus semillas; la razón precisa de esto aún se desconoce. Su reproducción por tanto ocurre por vía asexual.

La tasa de crecimiento de la caña del carrizo está entre las más altas en el reino vegetal, alcanzando los 10 cm/día. Concordantemente, la biomasa generada por el carrizo alcanza un promedio de 20.0 kg/ m², la más alta entre cualquier otro tipo de vegetación (*ibid.*). Esta tasa

tan elevada de crecimiento requiere correspondientemente un alto consumo de agua: la tasa de evapotranspiración (ET) del carrizo es en promedio de 20 mm/día (alcanzando hasta los 40 mm/día), siendo de 3 a 10 veces mayor que la de especies riparias nativas y una de las más altas del reino vegetal.

Mediante el desarrollo horizontal de los rizomas, cuya tasa de expansión es de hasta 26 cm/año (algunos autores reportan hasta 50 cm/año), una planta original de carrizo va formando un rodal a una tasa de desarrollo de 3.4 (\pm 2.7) cañas por año, alcanzando en la madurez una densidad de 40 cañas por m² en promedio (*ibid.*; GISD, 2015).

La dispersión del carrizo ocurre de forma natural por propagación vegetativa principalmente durante los eventos de disturbio fluvial por inundación, cuando la fuerza de la corriente desprende pedazos del sistema rizomático y/o del tallo de la caña y los transporta aguas abajo; al ser depositados en un substrato favorable, estos rizomas y/o tallos funcionan como propágulos, desarrollan raíces y se establecen, comenzando el desarrollo de una nueva planta. Un substrato favorable para el carrizo es prácticamente cualquier espacio barrido previamente de su vegetación natural por la fuerza de la corriente durante una inundación.

De tal forma, los regímenes naturales de disturbio que caracterizan a los ríos en climas de tipo Mediterráneo y son el elemento fundamental que mantiene la funcionalidad y estructura de los ambientes riparios, son a la vez propicios para la dispersión del carrizo, el cual está adaptado precisamente a esta dinámica de disturbio (Bell, 1997).

El éxito del carrizo como especie invasora se debe, además de a lo ya descrito, a su capacidad para adaptarse a suelos de baja calidad; a su tolerancia a un amplio rango de pH en el suelo; a su tolerancia a muy distintas condiciones de humedad, desde aquellas de sequía hasta aquellas sumamente húmedas; así como a su tolerancia a condiciones salinas de suelo (Flores *et al.*, 2008). Por otro lado, su tallo y hojas contienen variedad de compuestos químicos tóxicos, que reducen al mínimo su susceptibilidad a la herbivoría tanto por agentes silvestres como domésticos en su rango exótico de distribución (CIPC, 2011).

5.5.- Efectos de la invasión por carrizo sobre el sistema fluvial – ripario

Los efectos de la invasión por carrizo se pueden agrupar en dos vertientes interrelacionadas: las afectaciones al ambiente ripario, y las afectaciones al ambiente fluvial asociado.

6.5.1.- Afectaciones al ambiente ripario

Las afectaciones al ambiente ripario radican fundamentalmente en la alteración de la vegetación riparia nativa y consecuentemente de los demás componentes y procesos de la zona riparia que son dependientes de aquella, como lo es la mayoría de la biodiversidad que ahí encuentra hábitat y espacios funcionales en su ciclo de vida, y los flujos de organismos, materia y energía entre los ambientes acuático y terrestre.

Por un lado, la forma de crecimiento del carrizo, en rodales densos y monotípicos, implica el desplazamiento de la vegetación riparia nativa mediante competencia por recursos de agua, suelo, luz y nutrientes, así como la ocupación de aquellos espacios originalmente vacíos en la arquitectura del ambiente ripario, alterando por ende la estructura funcional del mismo y los recursos en alimento y refugio para la biodiversidad.

Por otro lado, la alta tasa de evapotranspiración del carrizo afecta a las especies riparias nativas, acaparando el agua del subsuelo con mayor eficiencia que ellas, y en casos llegando a disminuir el nivel del manto freático, dejándolo fuera del alcance de otras especies. A una tasa promedio de 20 mm/día, la ET del carrizo sobrepasa con creces la ET reportada para vegetación riparia nativa, cuyo rango va de 0.9 a 1.6 mm/día (Johns, 1989 en CIPC, 2011). Adicionalmente, la incisión y profundización del cauce provocada por el carrizo, explicada más adelante, ocasiona el descenso del manto freático bajo el ambiente ripario, afectando la captación de agua por parte de la vegetación riparia nativa y eventualmente aislándola del acceso al agua (Malanson, 1993).

Si bien literatura reporta una cobertura máxima por carrizo en llanuras de inundación de hasta el 55% (CIPC, 2011), este desplazamiento de la vegetación e invasión del espacio ripario puede llegar a ser absoluto, como es el caso de diversos sitios en Texas, EEUU (Flores y Wood, 2009) y como el autor de esta tesis ha observado en un cañón al noroeste de la cabecera municipal de Sacramento, Coahuila, en las inmediaciones de Cuatro Ciénegas de Carranza, en el año 2017.

La afectación a la biodiversidad de fauna en el ambiente ripario es resultado de la homogenización de paisaje y hábitats ocasionada por la sustitución de la vegetación riparia nativa por el carrizo. Muchos grupos taxonómicos son afectados:

- Se ha demostrado cómo la diversidad y abundancia de artrópodos es menor en manchones de carrizo en comparación a áreas de vegetación riparia nativa, hipotetizándose que la preferencia de artrópodos por la vegetación riparia responde a que ésta ofrece una estructura mucho más compleja para hábitat, un estrato de hojarasca edáfica más compleja y densa, y recursos alimenticios de mayor calidad (Herrera y Dudley, 2003). Por otro lado, el tallo y hojas del carrizo contienen químicos tóxicos que lo protegen de ser consumido por insectos y otros animales herbívoros (CIPC, 2011).
- Se ha observado que los manchones de carrizo carecen de funcionalidad como corredores biológicos, afectando a este respecto toda la fauna mayor, desde reptiles y anfibios, hasta aves y mamíferos, al crear barreras físicas para su movilidad dentro del ambiente ripario y hacia territorios adyacentes (Kisner, 2004).
- La afectación es notable para las aves, debido a la eliminación de espacios de alimentación, refugio, y anidación, así como a la reducción en la abundancia y diversidad de especies presa, principalmente insectos. Se ha demostrado cómo la abundancia y riqueza de aves es menor en áreas con presencia abundante de manchones de carrizo, en comparación a sitios de vegetación riparia nativa (*ibid.*).

Por otra parte, dada su alta flamabilidad, la presencia de carrizo en el ambiente ripario aumenta la probabilidad de ocurrencia de incendios, así como la intensidad de los mismos en caso de ocurrir (Scott, 1993 en CIPC, 2011). La intensa respuesta post-incendio de los rizomas del carrizo en desarrollar nuevas cañas supera en rapidez a la respuesta correspondiente de regeneración de la vegetación nativa, dando una ventaja competitiva al carrizo, que tras un incendio logra de este modo ocupar efectivamente el espacio anteriormente ocupado por especies nativas. Ultimadamente, la sustitución de la vegetación riparia nativa tiene el potencial de hacer transicionar al ambiente ripario desde un régimen definido por la dinámica fluvial hacia un régimen definido por incendios (Bell, 1997; Coffman *et al.*, 2010).

5.5.2.- Afectaciones al ambiente fluvial

Respecto a las afectaciones al ambiente fluvial, éstas son resultado de las alteraciones directas e indirectas que el carrizo ejerce tanto sobre la morfología del cauce, la llanura de inundación y la dinámica geomorfológica fluvial, como sobre los procesos de flujo de materia, energía y organismos entre el ambiente fluvial y el ripario.

Al establecerse principalmente a lo largo de un cauce, el sistema de rizomas del carrizo estabiliza los taludes del mismo mediante el reforzamiento por raíces y mediante acreción vertical, provocando el confinamiento del cauce y consecuentemente la incisión del lecho y la profundización del canal, aumentando con esto además la velocidad de la corriente (Gran y Paola, 2001 en CIPC, 2011).

En términos generales, lo anterior induce la simplificación de la geometría del cauce. Adicionalmente, el carrizo incrementa la tasa de deposición sedimentaria en las superficies invadidas. En los tramos fluviales cuya geometría corresponde a cauce trenzado, por ejemplo, la invasión de la llanura aluvial por carrizo ocasiona la paulatina sedimentación y efectiva

eliminación de los canales secundarios, transformando la geometría hacia aquella correspondiente a un cauce recto (Dean y Schmidt, 2010 en CIPC, 2011).

Como consecuencia, la obstrucción resultante al flujo natural del caudal, lleva por un lado a la incisión del lecho y profundización del canal ya mencionados, y por otro lado a incrementar el riesgo y ocurrencia de inundación sobretalud (*overbank flow*), así como la extensión e intensidad de inundaciones durante eventos hidrometeorológicos de largos períodos de retorno debido a estas alteraciones y al incremento de la rugosidad del cauce original y de la llanura de inundación (Spencer, 2010 en CIPC, 2011).

En este mismo tenor, el desprendimiento y transporte aguas abajo de grandes masas de cañas de carrizo por parte de fuertes inundaciones durante dichos eventos, implica un elevado riesgo derivado de la creación de represas por su acumulación aguas abajo.

Todas estas alteraciones geomorfológicas tienen consecuencias sobre la biodiversidad acuática, al modificar las condiciones específicas ambientales necesarias para la integridad de los hábitats.

La diversidad de hábitats acuáticos a lo largo de un río existe en función de la diversidad de formas o tramos de cauce y llanuras de inundación, que a su vez es resultado de los procesos geomorfológicos que definen a un sistema fluvial-ripario en el contexto particular de su cuenca y las características ambientales de ésta (Malanson, 1993; Brierley y Fryirs, 2005; Allan y Castillo, 2007).

Bajo tal contexto, la distribución de especies acuáticas y riparias es a su vez controlada por patrones de hábitats determinados por una miríada de atributos ambientales tales como la profundidad y velocidad de flujo, la temperatura, la distribución de substrato por tamaños, contenido de oxígeno, turbidez, nivel de humedad o saturación del suelo, y otras condiciones físico-químicas e influencias bióticas (Allan y Castillo, 2007).

La homogenización geomorfológica paisajística fluvial y la simplificación de cauces inducida por la invasión por carrizo afecta la diversidad de hábitats a través de la alteración de procesos y las características físicas y biológicas definidas por éstos y que definen a dichos hábitats. Tres ejemplos a continuación dan cuenta de ello (Malanson, 1993; Allan y Castillo, 2007; CIPC, 2011):

- El crecimiento del carrizo a lo largo de los márgenes de los cauces modifica la cantidad de luz que penetra al agua; dado que la incidencia de luz solar es uno de los principales factores determinantes de la temperatura de la corriente, ésta se ve modificada también. Muchas especies acuáticas que presentan rangos restringidos de tolerancia a la temperatura, fuera de los cuales no pueden sobrevivir, se ven afectadas por esta modificación.
- La sustitución de vegetación riparia nativa por carrizo altera una de las principales fuentes energéticas para el ecosistema fluvial, representada por el flujo de materia desde el ambiente ripario al fluvial; los aportes de materia orgánica vegetal bajo forma principalmente de hojarasca son uno de los fundamentos de la red trófica acuática, al representar la base alimenticia para los organismos detritívoros que son a su vez la base alimenticia para muchos organismos consumidores.
- Por otro lado, esta interrupción del flujo de materia desde el ambiente ripario al fluvial afecta procesos geomorfológicos formadores de hábitats, tales como la deposición en el cauce de troncos y ramas de árboles muertos, que funge como disparador del desarrollo de condiciones particulares de sustrato, velocidad de corriente, turbulencia, etc. necesarias para la conformación de hábitats.

Adicionalmente, algunas especies de peces requieren en su ciclo de vida el cumplimiento de una etapa de residencia en estanques residuales en la llanura aluvial posterior a eventos de inundación; estos estanques fungen para dichas especies como sitios de oviposición y donde se cumple el estadio juvenil de desarrollo biológico. La invasión por carrizo, a través de la ocupación física de la llanura aluvial, por un lado, y de la alteración de la conectividad fluvial-

llanura aluvial-riparia, por otro lado, altera la funcionalidad de la llanura aluvial para la biodiversidad en este sentido (Malanson, 1993).

5.6.- Afectaciones socioeconómicas de la invasión por carrizo

La afectación que puede argumentarse ser la más grave en el ámbito socioeconómico debido a la invasión por carrizo es aquella sobre el recurso hídrico.

En el 2001 se estimó que la extensión de 4 mil hectáreas de carrizo en el Río Santa Ana en California, EEUU implicaba la pérdida por evapotranspiración de 37,096,920 m³/año de agua, con un costo monetario estimado en \$ 18.2 millones de dólares (Hendrickson y McGaugh, 2005).

Más aún, con la misma facilidad con que invade al ambiente ripario, el carrizo invade también los canales de riego y acequias, haciendo necesarias acciones de limpieza frecuentes para conservar la funcionalidad de esta infraestructura. Estas invasiones pueden dañar además otro tipo de infraestructura como instalaciones de acuacultura, así como infraestructura de comunicaciones como puentes, vados y caminos, a través del aumento en el riesgo por inundación intrínseco a su presencia en densidades altas (Flores-Maldonado *et al.*, 2008).

En este mismo sentido el carrizo implica un riesgo por el peligro que representa por la ocurrencia de incendios, así como por el riesgo que representa el desprendimiento y transporte aguas abajo de grandes masas de carrizo por parte de la corriente durante fuertes inundaciones y la creación de represas por su acumulación aguas abajo.

También cabe mencionar que las masas densas de carrizo constituyen hábitats para especies de mosquitos vectores de enfermedades, incrementando el riesgo epidemiológico en núcleos habitacionales cercanos a los sitios invadidos (*ibid.*).

Una vez establecido ampliamente, los costos para el control y erradicación del carrizo son muy elevados, como ha sido demostrado ya en lugares como California, EEUU, en donde hasta el año 2011 se habían invertido más de 70 millones de dólares en un lapso de 15 años, sin lograr aún su erradicación efectiva (CIPC, 2011).

A esto debe sumarse el costo por la degradación y/o pérdida de los servicios ambientales brindados por los ecosistemas fluviales y riparios afectados, cuya cifra es difícil de estimar pero que sin lugar a dudas es muy alta.

5.7.- Factores que influyen en el establecimiento del carrizo

Se considera que de forma general las alteraciones a los sistemas fluviales han vuelto a los ambientes riparios susceptibles a la invasión por especies pioneras de disturbio, mediante la fragmentación del hábitat, la reducción en la diversidad biológica, y la alteración de la distribución de recursos (Palmer 1993 en Coffman, 2007).

Las actividades humanas han conllevado, entre otros aspectos, el incremento del aporte de nutrientes a cuerpos de agua desde tierras arriba en la cuenca por actividades agropecuarias y cambios de cobertura de suelo; la importación de agua entre cuencas; la exportación de agua para agricultura e industria; la remoción de vegetación riparia para desarrollo urbano; y el incremento en la frecuencia de incendios en comunidades vegetales adyacentes al río.

Particularmente, se ha sugerido que la alteración de los regímenes de disturbio hidrológico, condiciones de variable estrés ambiental, y el enriquecimiento con nutrientes en cuerpos de agua y zonas riparias son factores que contribuyen al éxito invasivo del carrizo y otras especies de plantas exóticas en ríos y humedales (Rieger y Kreager, 1989 en Coffman, 2007; Bell, 1997).

5.7.1.- Enriquecimiento antropogénico con nutrientes de ambientes riparios

Se ha demostrado que los requerimientos y capacidades de absorción nutricionales de las plantas exóticas invasoras les proporcionan una ventaja competitiva ante las plantas nativas bajo contextos de enriquecimiento nutricional ambiental (Maurer and Zedler, 2002; Claridge y Franklin, 2002). Se piensa además que esta ventaja es mayor en ambientes de climas mediterráneos, cuyos suelos y cuerpos de agua se caracterizan por un contenido relativamente bajo de nitrógeno (N) y fósforo (P) en comparación con regiones de climas distintos (Dallman, 1998 en Coffman, 2007).

Coffman (2007) realizó un estudio para determinar qué factores más allá del disturbio hidrológico natural en sistemas fluviales son responsables del éxito colonizador del carrizo en cuencas de clima mediterráneo, examinando la influencia del incremento de nutrientes, de humedad en suelo, y de disponibilidad de luz, así como de la ocurrencia repetitiva de incendios en los sistemas riparios, como factores contribuyentes a la invasión por *A. donax*.

Centrándose en N y P, Coffman comparó sus concentraciones entre cuencas de estudio con presencia de carrizo, desarrollo urbano–agrícola y presencia de fuentes de contaminación, y cuencas de referencia sin presencia de carrizo, poco o nulo desarrollo urbano–agrícola y ausencia de fuentes de contaminación. Las mediciones se realizaron en agua subsuperficial, agua subterránea y suelo en llanuras de inundación y terrazas fluviales, encontrándose niveles significativamente mayores en las cuencas de estudio que en las de referencia. En todos los sitios con invasión por carrizo, los niveles de N y P medidos fueron significativamente mayores, por lo que la autora concluyó que el N en exceso derivado de prácticas de manejo en la cuenca promueven el desarrollo de *A. donax* y su invasión en sistemas riparios.

Estos resultados se contextualizan en lo demostrado por Ahearn *et al.* (2005) y Robinson *et al.* (2005), citados por Coffman (2007), en cuanto a la influencia que sobre la diferencia en concentraciones de nutrientes en ecosistemas riparios entre cuencas con similitudes en geología, clima y vegetación tiene la variación en usos de suelo.

Coffman (*ibid.*) evaluó además el crecimiento de *A. donax* bajo distintas combinaciones de incremento de nutrientes, de humedad en suelo y luz en comparación con tres especies riparias nativas. El carrizo presentó mayor biomasa respecto a las especies nativas bajo todas las condiciones de disponibilidad de recursos experimentadas, evidenciando su plasticidad ecológica como un factor que determina su capacidad invasiva.

5.7.2.- Competencia interespecífica

Por otro lado, se plantea que altos niveles de recursos ambientales y una superior capacidad competitiva por dichos recursos respecto a la de plantas nativas promueven la invasión por plantas exóticas en ecosistemas riparios (Wang, 1998; Suding *et al.*, 2004; White, 2005; Richardson, 2006; citados por Coffman, 2007). Algunos estudios experimentales han demostrado la incidencia en ecosistemas dulceacuícolas de una superior capacidad competitiva por parte de plantas invasoras en el aprovechamiento de nutrientes y/o agua (D'Antonio, 1992; Hamilton *et al.*, 1999; Gordon, 2000; Suding *et al.*, 2004; Richardson, 2006; Coleman, 2007; citados por Coffman, 2007).

Sin embargo, persiste controversia sobre la importancia relativa de la competencia interespecífica en ambientes productivos y no productivos, pues autores como Grime (1977) afirman que la competencia es insignificante en ambientes estresados, otros como Tilman (1988) sostienen que la competencia ocurre de diversas formas a lo largo de un gradiente de productividad ambiental, y Alpert *et al.* (2000) y Daehler (2003) consideran que el estrés ambiental determina el balance competitivo interespecífico, sugiriendo que a abundancia de recursos (bajo estrés ambiental), las plantas invasoras logran una ventaja sobre las nativas, mientras que a baja disponibilidad de recursos (alto estrés ambiental), dichas plantas se ven en desventaja ante las nativas.

El estudio ya citado de Coffman (2007) también examinó la interacción competitiva entre el carrizo y distintas especies riparias nativas, encontrando resultados variables con base en las distintas condiciones ambientales experimentadas: en condiciones de bajo estrés ambiental,

caracterizadas por amplia disponibilidad de recursos, el carrizo presentó mayores probabilidades de invadir el ambiente ripario, mientras que en condiciones de alto estrés ambiental y baja disponibilidad de recursos, presentó menores probabilidades de éxito invasivo.

Este hallazgo, concordante con lo afirmado por Alpert *et al.* (2000) y Daehler (2003), refleja las condiciones ecológicas particulares que caracterizan a los ambientes riparios, que se distinguen por la prevalencia de alto estrés ambiental impuesto por los patrones de disturbio hidrológico, condiciones bajo las cuales las especies riparias nativas evolucionaron y a las cuales están adaptadas; esta adaptación representa una capacidad competitiva propia de las especies riparias nativas bajo condiciones de alto estrés ambiental.

5.7.3.- Ocurrencia de incendios

Como se mencionó anteriormente, la alta tasa de desarrollo propia del carrizo, aunado a su rapidez de regeneración, le permite a *A. donax* dominar los ecosistemas riparios después de un incendio y ocupar el espacio anteriormente ocupado por especies nativas, al superar en rapidez a la respuesta correspondiente de regeneración de éstas.

En concordancia con lo expuesto relativo al enriquecimiento nutricional del suelo, es en el mismo sentido que la característica elevación de nutrientes edafológicos posterior a un incendio contribuye a la alta tasa de regeneración del carrizo en dicho contexto (Bell, 1997; Coffman *et al.*, 2010; CIPC, 2011)

5.8.- Trabajos antecedentes de investigación en la subcuenca del río Pílon

Los trabajos de investigación científica realizados en el territorio de la subcuenca del río Pílon son pocos, y reducida su amplitud de temas tratados.

El más antiguo de que se tiene conocimiento es el de Sánchez (1987), quien realizó una caracterización hidrológica en la que describió la dinámica cíclica del caudal, comparando distintos tipos de gastos y estimando la distribución estadística del gasto máximo anual y sus probabilidades.

Otro trabajo hidrológico fue el de Návar y Rodríguez (2002), quienes caracterizaron las superficies agrícolas y sus volúmenes de irrigación en la cuenca del río San Juan, del cual es tributario el río Pílon. En dicho estudio se predijeron los caudales necesarios para irrigar la superficie bajo tres diferentes escenarios de precipitación, como una forma de inventariar la necesidad de agua por el sector agrícola en la región.

El primer trabajo botánico enfocado específicamente en la subcuenca del río Pílon fue el de Mata-Balderas (2004), quien caracterizó los tipos de vegetación presentes en ella, su dominancia y grado de cobertura.

En el aspecto forestal se cuenta con los trabajos de Antonio-Némiga *et al.* (2006 y 2008), el primero de los cuales describe los cambios que en la vegetación de la subcuenca ocurrieron durante el período 1974-2000 mediante la interpretación de imágenes de satélite; el segundo evalúa la fragmentación de las comunidades vegetacionales, en tamaño, forma y conectividad, con base en lo cual propone fragmentos prioritarios a conservar.

Existen trabajos amplios cuyo territorio de estudio abarca la subcuenca del río Pílon, como el diagnóstico integral de la cuenca del río San Juan realizado por el ITESM (2009), que analiza aguas superficiales y subterráneas en su disponibilidad y calidad, el uso agrícola y aspectos socioeconómicos y ambientales; y el realizado por el IAENL (2011), consistente en un diagnóstico sobre la gestión y el uso del agua en el sector agropecuario de Nuevo León.

Por otro lado, Martínez-Zepeda (2012) realizó un trabajo en el que determinó los caudales ambientales para los ríos de la cuenca del río San Juan, mediante la aplicación de métodos hidrológicos. Este trabajo fue complementado más adelante por Vidales *et al.* (2014) quienes

determinaron las tasas de caudal ecológico específicamente en el río Pílon, mediante índices hidrológicos.

5.9.- Clasificación geomorfológica fluvial de Rosgen

Uno de los puntos fundamentales del estudio hidrogeomorfológico de los ríos es la clasificación tipológica fluvial, cuya finalidad principal es coadyuvar a la comprensión de su morfología y patrones estructurales, así como el desarrollo de interpretaciones e inferencias acerca de los procesos subyacentes (Wheaton *et al.*, 2015). Dicha comprensión es fundamental para la evaluación de los efectos que disturbios naturales y antrópicos ejercen sobre el sistema fluvial y para entender la dinámica fluvial en sus cambios pasados, en sus condiciones actuales y en sus posibles respuestas ante futuros eventos, sean éstos disturbios o acciones de restauración (Buffington y Montgomery, 2013).

Existe una amplia variedad de métodos de clasificación geomorfológica, cuyo desarrollo comenzó aproximadamente a inicios del 1900. Los métodos se distinguen principalmente por la escala territorial de aplicación, por su enfoque (descriptivo o funcional) y por los criterios empleados en la clasificación.

Uno de los métodos mayormente utilizados es la Clasificación de Rosgen (1994), desarrollada para cuencas en montaña, con aplicación multiescalar desde valle hasta segmento fluvial, y enfoque tanto descriptivo como funcional. Organizada jerárquicamente en cuatro niveles, esta clasificación abarca desde la delimitación general geomorfológica del paisaje de valle fluvial hasta mediciones a pequeña escala de procesos físicos y elementos biológicos ocurrientes en el segmento fluvial: los niveles I y II tienen fines descriptivos, el nivel III tiene fines de planeación de acciones de manejo y restauración de ríos, y el nivel IV tiene fines de evaluación de dichas acciones (Endreny, 2003). La clasificación de Rosgen es considerada como una de las más completas y exhaustivas (Knighton, 1998), lo cual se demuestra por su uso frecuente tanto por investigadores académicos como por agencias gubernamentales norteamericanas y europeas (Buffington y Montgomery, 2000; Quinonez, 2007).

Esta clasificación se basa en un procedimiento sistemático para jerarquizar unidades fluviales con base en la caracterización del paisaje circundante y del patrón o forma (perfil vertical), la pendiente (perfil longitudinal), la dimensión (perfil transversal) y el substrato de dichas unidades fluviales.

6.- MATERIALES Y MÉTODOS

6.1.- Área de estudio

6.1.1.- Ubicación

La subcuenca del río Pílon se ubica en el centro-sur del estado de Nuevo León y parcialmente en el estado de Coahuila (Figura 1). Tiene una extensión superficial de 2,407 km². Forma parte de la Cuenca del río Bravo – San Juan, que a su vez pertenece a la Región Hidrológica RH24Bh Bravo-Conchos.

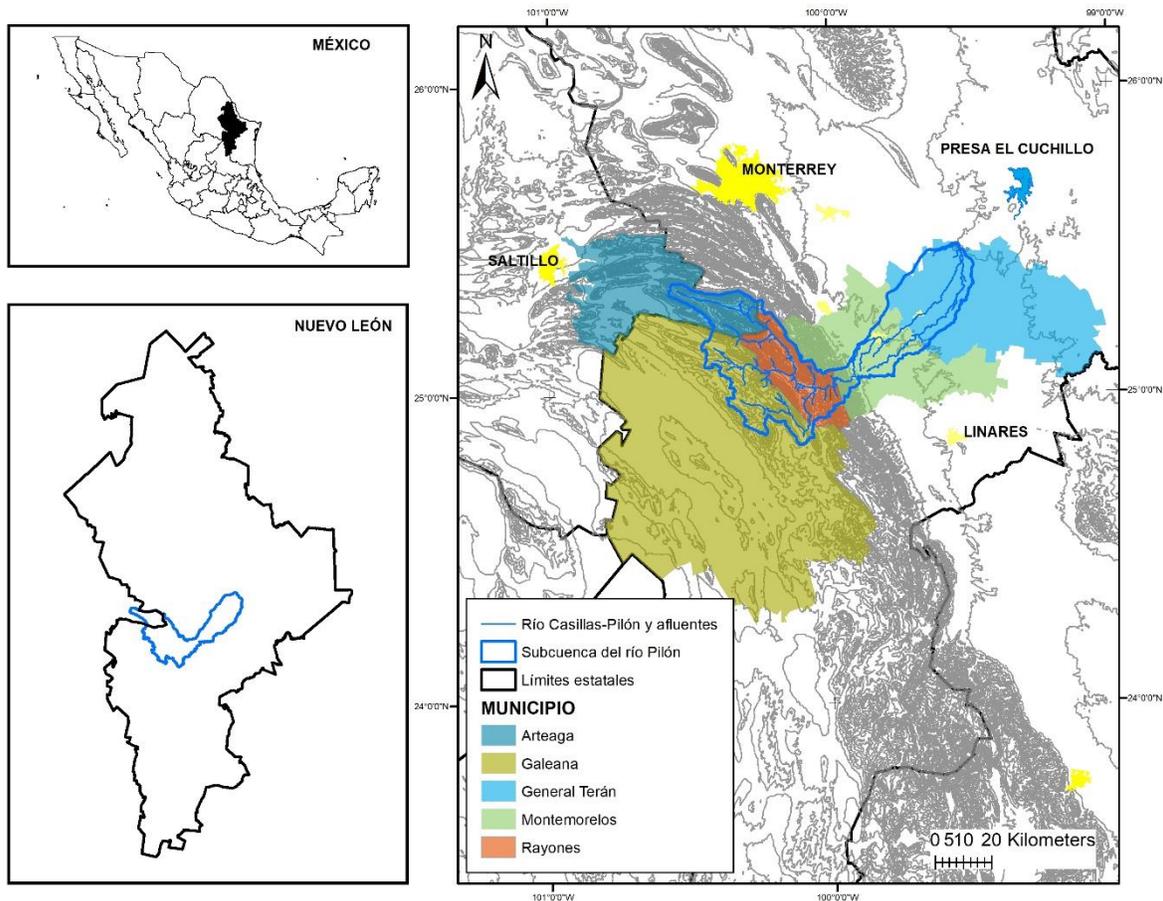


Figura 1. Ubicación de la subcuenca del río Pílon en los estados de Nuevo León y Coahuila. Se muestran las corrientes principales y los municipios abarcados.

Los municipios comprendidos dentro de la subcuenca del río Pílon son Arteaga (Coahuila), Galeana, Rayones, Montemorelos y General Terán (Nuevo León) (Figura 1). Pertenece a la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental; las partes alta y media de la subcuenca se ubican en la subprovincia Gran Sierra Plegada y la parte baja en la subprovincia Llanuras y Lomeríos (Figura 2).

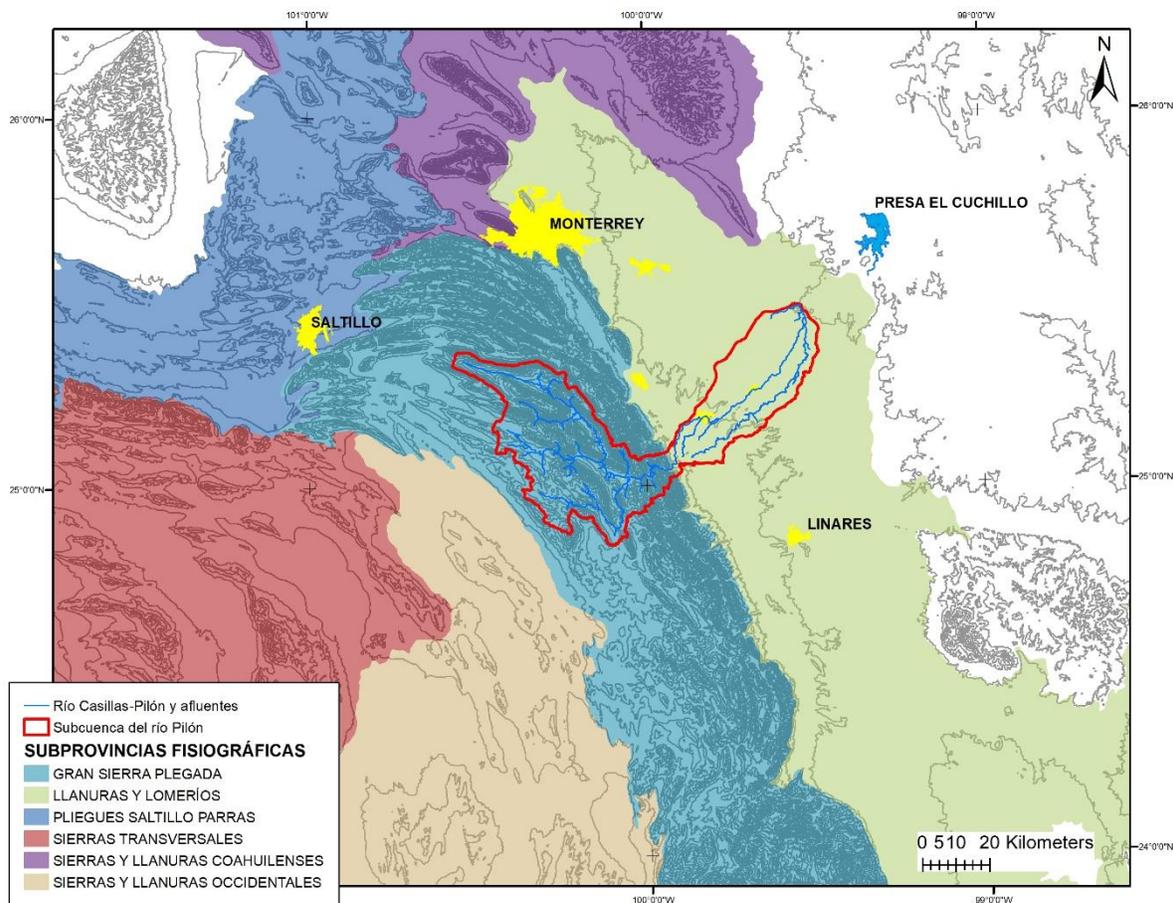


Figura 2. Contexto fisiográfico de la subcuenca del río Pílon

6.1.2.- Descripción del medio biofísico

Debido a su ubicación compartida entre las subprovincias fisiográficas Gran Sierra Plegada y Llanuras y Lomeríos (Figura 2), la subcuenca del río Pílon presenta una marcada diversidad ecosistémica como consecuencia del mosaico de condiciones altitudinales, geológicas, edafológicas, y climáticas presente en su territorio (Figura 3).

La Gran Sierra Plegada conforma el macizo principal de la Sierra Madre Oriental; está conformada por una serie continua de anticlinales y sinclinales de marcada verticalidad, manifestación física del plegamiento de la corteza terrestre ocurrida durante la Orogenia Larámide que tuvo inicio hace 65 millones de años, dando origen a estas montañas. Aquí es donde se presentan las mayores elevaciones en la subcuenca del río Pílon, cuyo rango altitudinal tiene como elevación máxima los 3,720 msnm y un promedio de 2,220 msnm, hallándose su elevación mínima de 190 msnm en la subprovincia Llanuras y Lomeríos.



Figura 3. Muestra de la diversidad ambiental en la subcuenca del río Pilón

6.1.2.1.- Geología

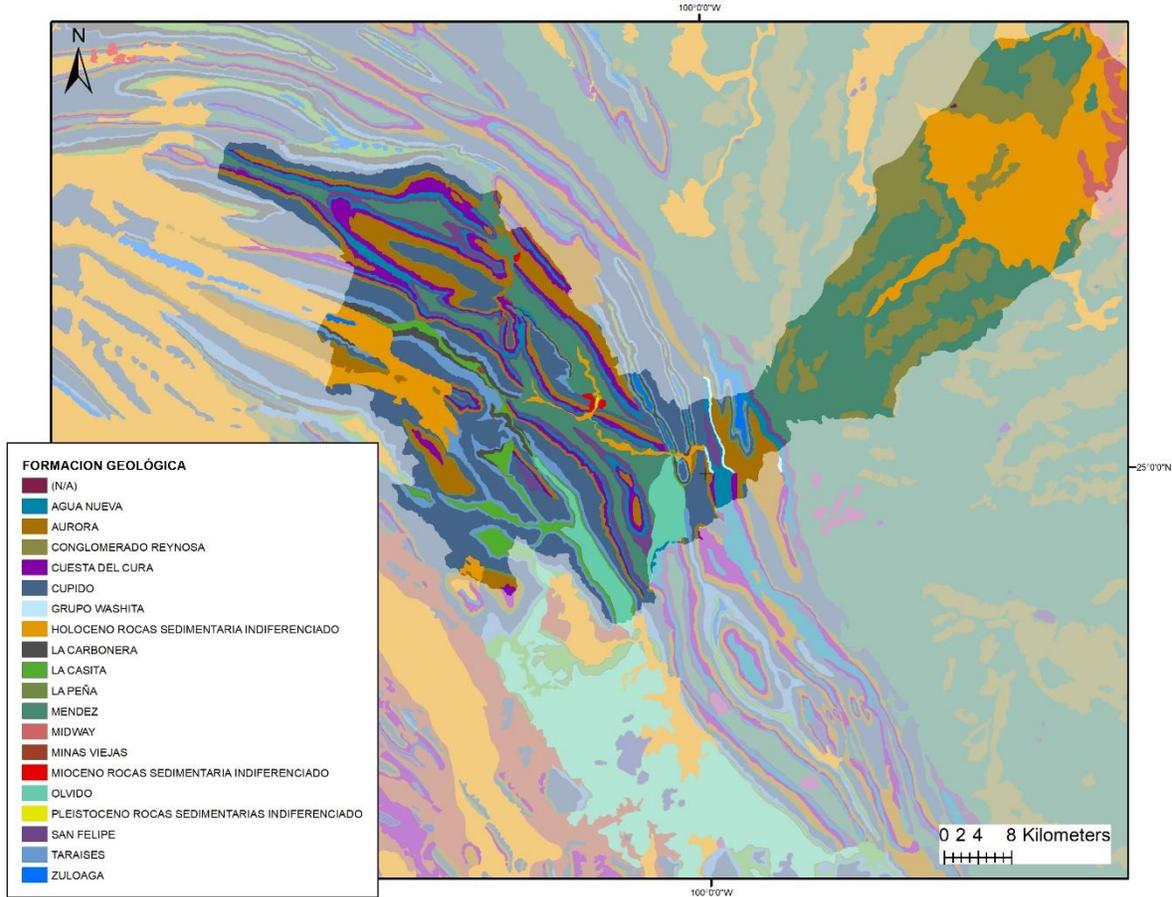


Figura 4. Formaciones geológicas en la subcuenca del río Pílon

La Gran Sierra Plegada está conformada principalmente por rocas sedimentarias de la era Mesozoica, que corresponden a formaciones geológicas de origen marino de los períodos Jurásico Superior y Cretácico (SGM, 2008); se encuentran además depósitos aluviales de origen continental de los períodos Terciario y Cuaternario de la Era Cenozoica, distribuidos principalmente a lo largo de los lechos de los arroyos de la sierra (Figura 4).

Las rocas que constituyen a las sierras en el área de estudio pertenecen a formaciones geológicas que varían en antigüedad desde el Jurásico Superior hasta el Cretácico Superior. En orden decreciente de antigüedad, las formaciones presentes son Minas Viejas, Olvido, Zuloaga, La Casita, La Carbonera, Taraises, Cupido, La Peña, Aurora, Cuesta del Cura, Grupo Washita, Agua Nueva, Indidura, San Felipe y Méndez (SGM, 2008). Éstas representan

el conjunto de depósitos marinos predominante en las partes alta y media de la subcuenca; se encuentra además un conjunto de depósitos continentales de los períodos Terciario y Cuaternario integrados por sedimentos aluviales, gravas y arenas, así como brechas y conglomerados, depositados en los valles y fondos de los cañones que forman los lechos de los ríos de la cuenca, y predominantes en la parte baja de la subcuenca.

6.1.2.2.- Suelos

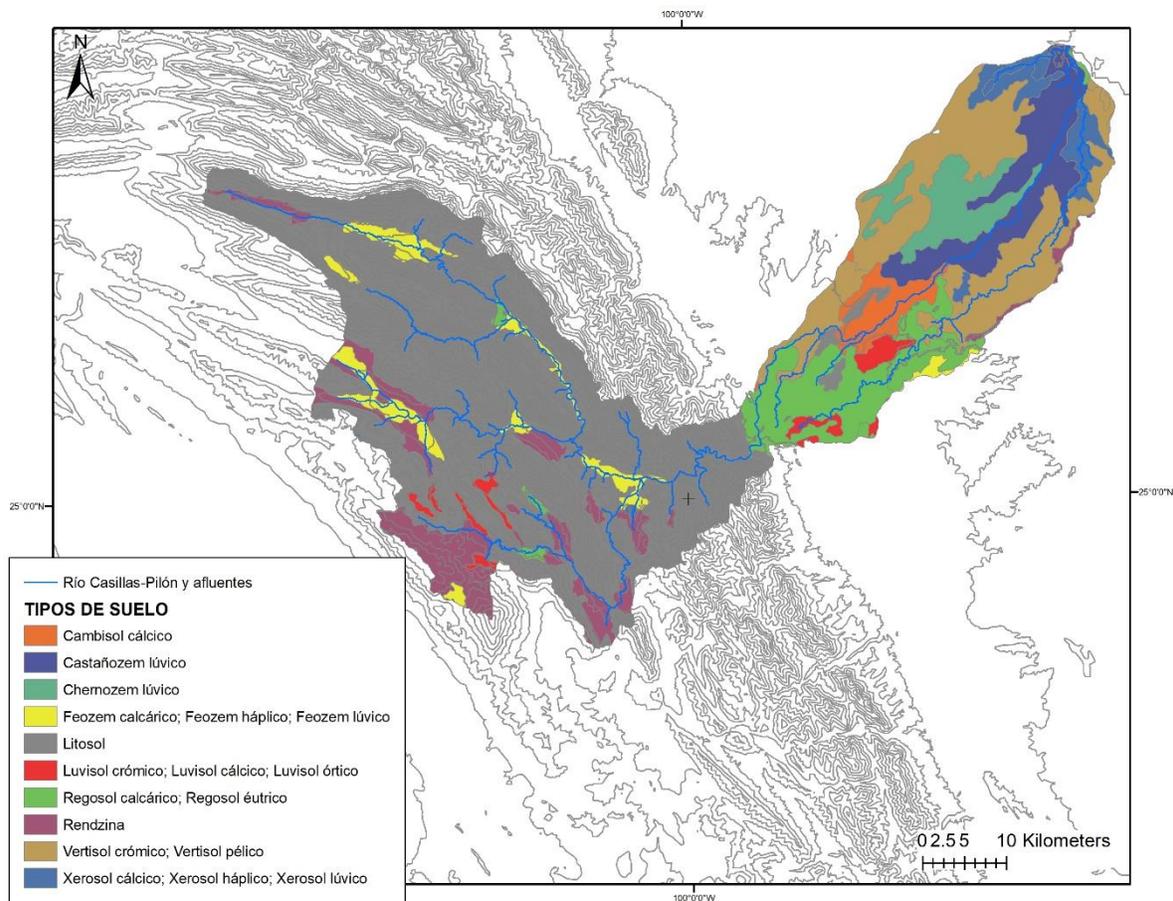


Figura 5. Tipos de suelo en la subcuenca del río Pilón

Los suelos presentes son los litosoles, rendzinas, castañozems, regosoles, vertisoles, cambisoles, chernozems, xerosoles, feozems y luvisoles. En las partes alta y media de la

subcuenca predomina el litosol, mientras que en la parte baja existe más diversidad, abundando los vertisoles, regosoles y castañozem (Figura 5).

6.1.2.3.- Clima

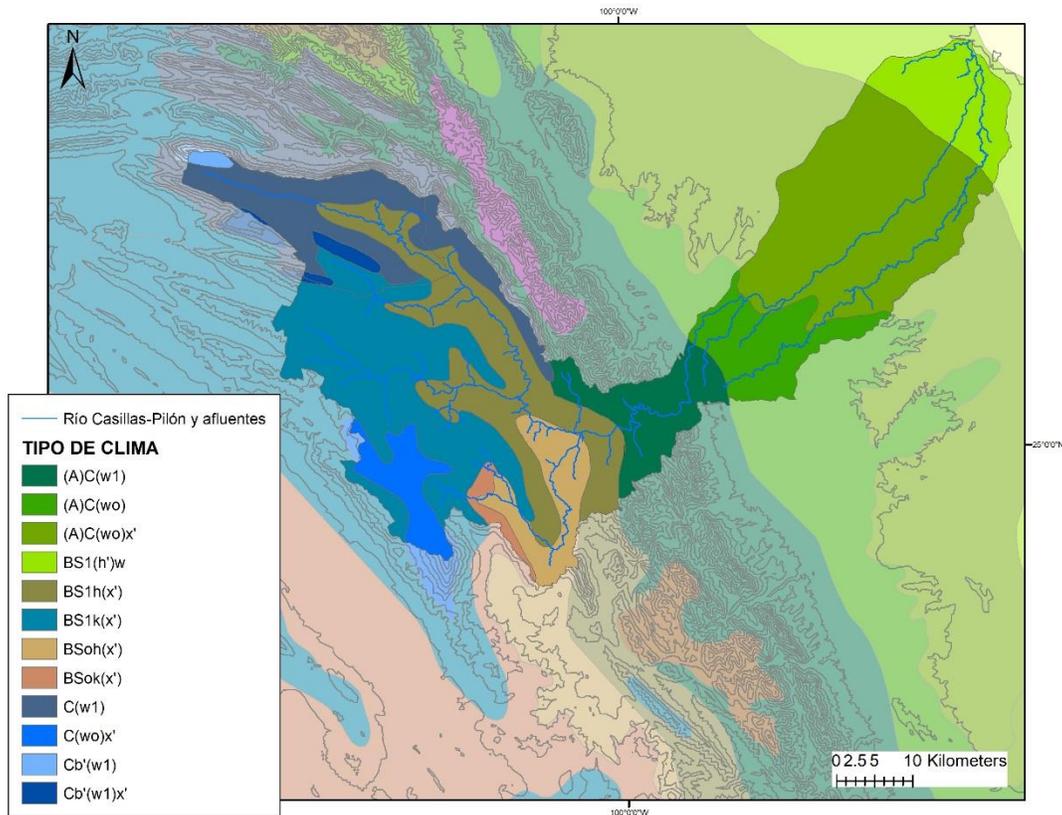


Figura 6. Tipos de clima en la subcuenca del río Pilón

Los climas presentes en las partes alta y media de la subcuenca del río Pilón se muestran en la Figura 6 y el Cuadro 1. Los datos de precipitación y temperatura y los climogramas para las distintas estaciones meteorológicas en la subcuenca se muestran en los Cuadros 2, 3 y 4 y las Figuras 7,8 y 9.

Cuadro 1. Tipos de clima en la subcuenca del río Pílon y su descripción

| CLAVE | NOMBRE | TEMPERATURA | | PRECIPITACIÓN | | UBICACIÓN |
|------------|---|----------------|-----------|---------------|---------------|---|
| (A)C(w1) | Semicálido, subhúmedo | Media anual | > 18 °C | Temporada | Verano | Cañón Puerta La Boca (cañón del río Pílon) |
| | | Mes más frío | < 18 °C | Índice P/T | 43.2 - 55 | |
| | | Mes más cálido | > 22 °C | Mínima | < 40 mm | |
| | | | | % invernal | 5-10.2% anual | |
| (A)C(wo) | Semicálido, subhúmedo | Media anual | > 18 °C | Temporada | Verano | Valle del Pílon, Montemorelos |
| | | Mes más frío | < 18 °C | Índice P/T | < 43.2 | |
| | | Mes más cálido | > 22 °C | Mínima | < 40 mm | |
| | | | | % invernal | 5-10.2% anual | |
| (A)C(wo)x' | Semicálido, subhúmedo | Media anual | > 18 °C | Temporada | Verano | Valle del Pílon, General Terán |
| | | Mes más frío | < 18 °C | Índice P/T | n/a | |
| | | Mes más cálido | > 22 °C | Mínima | < 40 mm | |
| | | | | % invernal | > 10.2% anual | |
| BS1(h')w | Semiárido, cálido | Media anual | > 22 °C | Temporada | Verano | Confluencia con el río San Juan |
| | | Mes más frío | > 18 °C | Índice P/T | n/a | |
| | | Mes más cálido | n/a | Mínima | n/a | |
| | | | | % invernal | 5-10.2% anual | |
| BS1h(x') | Semiárido, semicálido | Media anual | > 18 °C | Temporada | Todo el año | Fondo de valle del río Casillas y del arroyo Santa Rosa |
| | | Mes más frío | < 18 °C | Índice P/T | n/a | |
| | | Mes más cálido | > 22 °C | Mínima | n/a | |
| | | | | % invernal | > 18% anual | |
| BS1k(x') | Semiárido, templado | Media anual | 12 - 18°C | Temporada | Verano | Cabeceras de afluentes occidentales (El Tragadero y arroyo Santa Rosa) |
| | | Mes más frío | -3 - 18°C | Índice P/T | n/a | |
| | | Mes más cálido | < 22 °C | Mínima | n/a | |
| | | | | % invernal | > 18 % anual | |
| BSoh(x') | Árido, semicálido | Media anual | 18 - 22°C | Temporada | Todo el año | Fondo de valle del arroyo Pílon o Juquialanes |
| | | Mes más frío | < 18 °C | Índice P/T | n/a | |
| | | Mes más cálido | > 22 °C | Mínima | n/a | |
| | | | | % invernal | 5-10.2% anual | |
| BSok(x') | Árido, templado | Media anual | 12 - 18°C | Temporada | Todo el año | Precabecera del afluente arroyo Pílon o Juquialanes |
| | | Mes más frío | -3 - 18°C | Índice P/T | n/a | |
| | | Mes más cálido | < 22 °C | Mínima | n/a | |
| | | | | % invernal | > 18 % anual | |
| C(w1) | Templado, subhúmedo | Media anual | 12 - 18°C | Temporada | Verano | Extremo noroeste de la subcuenca, y franja continua de parteaguas norte |
| | | Mes más frío | -3 - 18°C | Índice P/T | 43.2 - 55 | |
| | | Mes más cálido | < 22 °C | Mínima | < 40 mm | |
| | | | | % invernal | 5-10.2% anual | |
| C(wo)x' | Templado, subhúmedo | Media anual | 12 - 18°C | Temporada | Verano | Extremo suroeste de la subcuenca, macizo del cerro El Potosí |
| | | Mes más frío | -3 - 18°C | Índice P/T | n/a | |
| | | Mes más cálido | < 22 °C | Mínima | < 40 mm | |
| | | | | % invernal | > 10.2% anual | |
| Cb'(w1) | Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo | Media anual | 5 - 12°C | Temporada | Verano | Extremo noroeste de la subcuenca |
| | | Mes más frío | -3 - 18°C | Índice P/T | n/a | |
| | | Mes más cálido | < 22 °C | Mínima | < 40 mm | |
| | | | | % invernal | 5-10.2% anual | |
| Cb'(w1)x' | Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo | Media anual | 5 - 12°C | Temporada | Verano | Sierra El Coahuilón |
| | | Mes más frío | -3 - 18°C | Índice P/T | n/a | |
| | | Mes más cálido | < 22 °C | Mínima | < 40 mm | |
| | | | | % invernal | > 10.2% anual | |

Cuadro 2. Datos normales de precipitación (mm) y temperatura (°C) registrados por las estaciones meteorológicas correspondientes a la parte alta de la subcuenca del río Pilón

| | CIÉNEGA LA PURÍSIMA (1951-2010) Altitud: 2420 msnm | | LOS MIMBRES (1981-2010) Altitud: 2,331 msnm | | CIÉNEGA DEL TORO (1951-2010) Altitud: 2140 msnm | | POTRERO DE ÁBREGO (1951-2010) Altitud: 1740 msnm | |
|--------------|---|-------------|--|-------------|--|-------------|---|-------------|
| MES | PRECIP | TEMP | PRECIP | TEMP | PRECIP | TEMP | PRECIP | TEMP |
| Enero | 40.7 | 12.4 | 33.2 | 9.4 | 27.2 | 9.5 | 33.0 | 13.2 |
| Febrero | 29.0 | 12.7 | 18.0 | 10.9 | 15.6 | 10.0 | 18.2 | 14.9 |
| Marzo | 21.2 | 13.7 | 20.8 | 13.1 | 19.7 | 11.5 | 20.2 | 15.9 |
| Abril | 31.7 | 15.9 | 32.6 | 15.3 | 35.0 | 13.7 | 19.7 | 17.5 |
| Mayo | 55.1 | 17.0 | 69.8 | 16.7 | 60.3 | 15.0 | 37.8 | 18.0 |
| Junio | 73.7 | 17.9 | 85.8 | 16.9 | 54.3 | 15.7 | 52.9 | 18.4 |
| Julio | 119.7 | 17.6 | 75.3 | 16.3 | 67.1 | 15.4 | 40.3 | 18.1 |
| Agosto | 93.3 | 17.3 | 105.7 | 16.2 | 71.4 | 14.9 | 50.1 | 18.2 |
| Septiembre | 106.8 | 16.5 | 99.1 | 14.9 | 68.6 | 14.0 | 78.4 | 17.8 |
| Octubre | 56.5 | 15.7 | 53.8 | 13.5 | 43.7 | 12.4 | 35.4 | 17.1 |
| Noviembre | 28.4 | 14.6 | 18.5 | 12.2 | 18.5 | 11.1 | 18.7 | 15.1 |
| Diciembre | 23.3 | 13.2 | 23.1 | 10.5 | 22.0 | 9.4 | 21.1 | 13.6 |
| ANUAL | 679.4 | 15.4 | 635.7 | 13.8 | 503.4 | 12.7 | 425.8 | 16.5 |

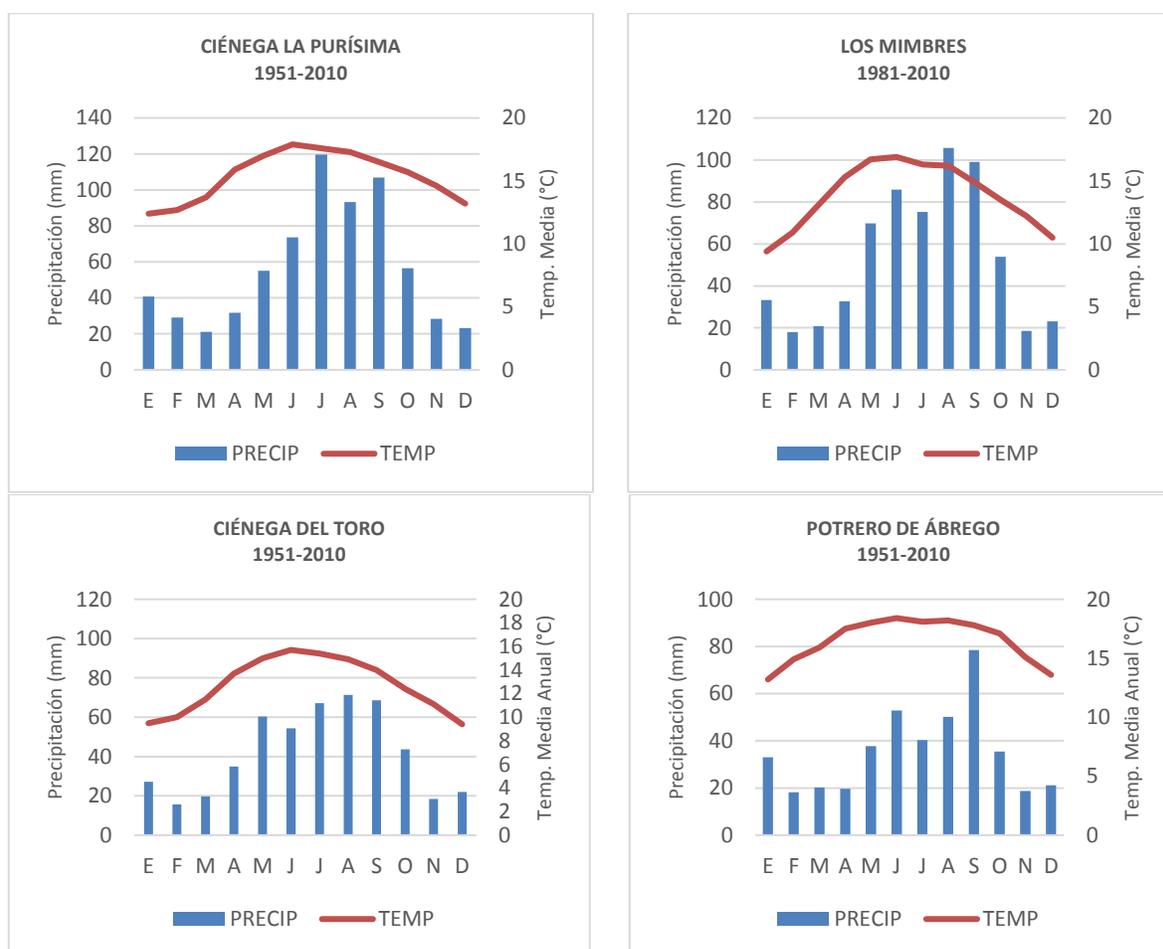


Figura 7. Climogramas correspondientes a la parte alta de la subcuenca del río Pilón

Cuadro 3. Datos normales de precipitación (mm) y temperatura (°C) registrados por las estaciones meteorológicas correspondientes a la parte media de la subcuenca del río Pilón

| MES | CASILLAS (1951-2010) Altitud: 1279 msnm | | RAYONES (1951-2010) Altitud: 848 msnm | |
|--------------|--|------|---|------|
| | PRECIP | TEMP | PRECIP | TEMP |
| Enero | 18.4 | 13.0 | 13.3 | 14.2 |
| Febrero | 10.7 | 14.3 | 8.8 | 16.2 |
| Marzo | 13.7 | 17.0 | 13.7 | 19.6 |
| Abril | 25.3 | 19.8 | 29.7 | 22.4 |
| Mayo | 51.6 | 22.5 | 46.3 | 23.8 |
| Junio | 76.7 | 23.7 | 46.0 | 25.0 |
| Julio | 70.9 | 24.0 | 37.7 | 24.9 |
| Agosto | 77.0 | 23.9 | 64.6 | 24.9 |
| Septiembre | 117.7 | 22.0 | 101.8 | 23.3 |
| Octubre | 60.1 | 19.2 | 40.5 | 20.8 |
| Noviembre | 14.9 | 16.1 | 12.7 | 18.2 |
| Diciembre | 12.5 | 13.2 | 11.0 | 14.6 |
| ANUAL | 549.5 | 19.1 | 426.1 | 20.7 |

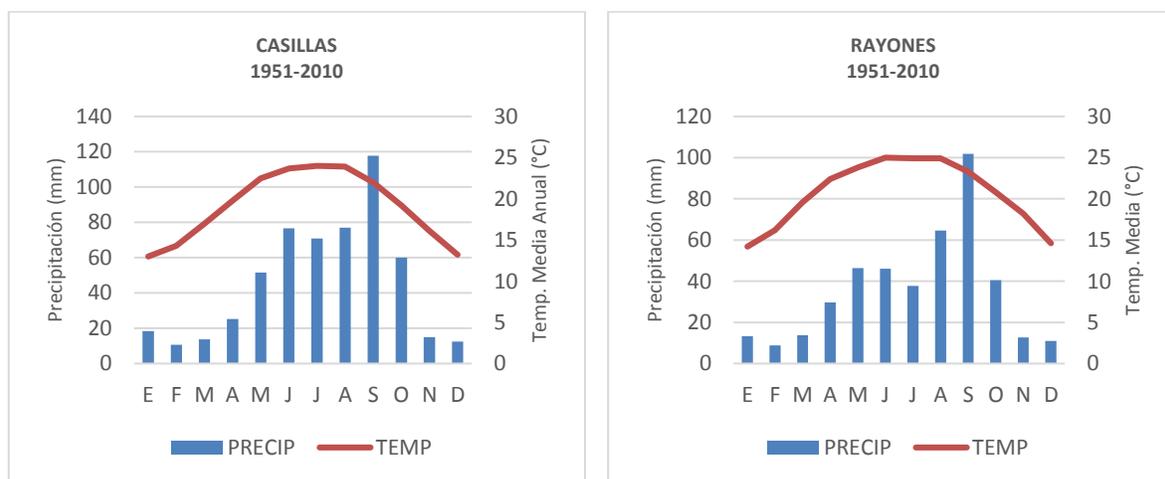


Figura 8. Climogramas correspondientes a la parte media de la subcuenca del río Pilón

Cuadro 4. Datos normales de precipitación (mm) y temperatura (°C) registrados por las estaciones meteorológicas correspondientes a la parte baja de la subcuenca del río Pilón

| MES | LAMPACITOS (1951-2010) Altitud: 500 msnm | | MONTEMORELOS (1981-2010) Altitud: 421 msnm | | LAS BRISAS (1951-2010) Altitud: 229 msnm | |
|--------------|--|-------------|--|-------------|--|-------------|
| | PRECIP | TEMP | PRECIP | TEMP | PRECIP | TEMP |
| Enero | 36.1 | 13.6 | 34.6 | 15.1 | 15.5 | 15.2 |
| Febrero | 30.2 | 15.6 | 24.5 | 17.3 | 22.8 | 17.2 |
| Marzo | 26.5 | 19.0 | 40.0 | 20.3 | 28.9 | 21.3 |
| Abril | 44.3 | 22.1 | 67.3 | 24.1 | 54.4 | 24.9 |
| Mayo | 53.1 | 24.9 | 83.8 | 27.0 | 87.8 | 28.3 |
| Junio | 56.4 | 26.7 | 76.9 | 29.1 | 60.9 | 30.3 |
| Julio | 54.2 | 27.5 | 81.6 | 29.3 | 87.7 | 31.0 |
| Agosto | 97.8 | 27.4 | 101.6 | 29.5 | 82.6 | 30.9 |
| Septiembre | 196.8 | 25.3 | 216.0 | 26.6 | 173.8 | 27.9 |
| Octubre | 113.4 | 21.5 | 92.7 | 23.1 | 91.9 | 23.9 |
| Noviembre | 21.4 | 17.6 | 24.4 | 19.1 | 20.0 | 19.5 |
| Diciembre | 12.3 | 14.0 | 17.7 | 15.5 | 12.5 | 14.5 |
| ANUAL | 752.5 | 21.3 | 861.1 | 23.0 | 738.8 | 23.7 |

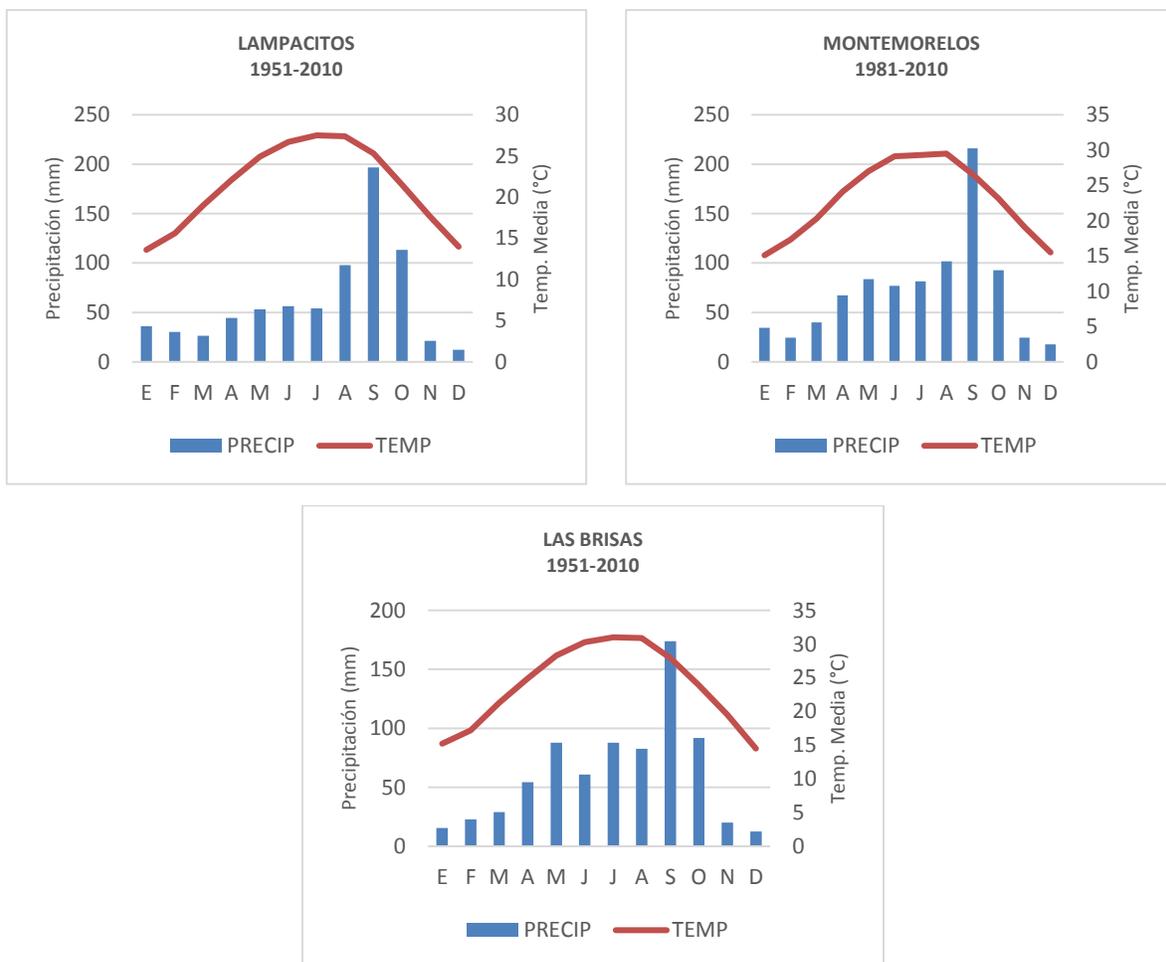


Figura 9. Climogramas correspondientes a la parte baja de la subcuenca del río Pilón

6.1.2.4.- Vegetación y uso de suelo

Es en la Gran Sierra Plegada donde se encuentran las principales masas de bosques templados, principalmente bosques de pino, mixtos, de encino, y de coníferas, así como extensas superficies ocupadas por matorrales, intergradados con los bosques templados en un mosaico de vegetación que refleja la diversidad de microclimas y suelos derivados de la diversidad topográfica que caracteriza a esta subprovincia. En las Llanuras y Lomeríos se encuentran de forma natural matorrales espinosos y mezquiales, pero actualmente la superficie de la subcuenca correspondiente a esta subprovincia está ocupada predominantemente por agricultura de riego y pastizales cultivados.

Los tipos de vegetación presentes en la subcuenca del río Pilon son los matorrales submontano, desértico y tamaulipeco; el chaparral; el pastizal; el mezquital; el bosque de encino, los bosques mixtos de encino-pino y pino-encino, el bosque de pino, el de oyamel y el de ayarín; y los bosques de galería o vegetación riparia (Mata-Balderas, 2004; INEGI, 2016) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Uso de suelo y vegetación en la subcuenca del río Pilon

| TIPO DE VEGETACIÓN | EXTENSIÓN (ha) | PORCENTAJE (%) |
|---|----------------|----------------|
| Bosque de pino | 31,799 | 12 |
| Bosque de encino | 5,473 | 2 |
| Bosque mixto | 5,050 | 2 |
| Bosque de oyamel | 346 | 0.1 |
| Bosque de ayarín | 1,048 | 0.4 |
| Matorral submontano | 40,839 | 15.4 |
| Matorrales desérticos | 13,444 | 5 |
| Matorral espinoso tamaulipeco (MET) | 1,813 | 0.7 |
| Chaparral | 206 | 0.08 |
| Mezquital xerófilo | 6,757 | 2.5 |
| Vegetación secundaria (bosque de pino) | 43,990 | 16.6 |
| Vegetación secundaria (bosque mixto) | 3,016 | 1.1 |
| Vegetación secundaria (bosque de oyamel) | 987 | 0.4 |
| Vegetación secundaria (bosque de ayarín) | 3,763 | 1.4 |
| Vegetación secundaria (matorral submontano) | 6,110 | 2.3 |
| Vegetación secundaria (matorrales desérticos) | 747 | 0.3 |
| Vegetación secundaria (MET) | 361 | 0.1 |
| Agricultura de riego | 56,850 | 21.5 |
| Agricultura de temporal | 28,827 | 11 |
| Pastizal inducido | 4,257 | 1.6 |
| Pastizal cultivado | 6,525 | 2.5 |
| Área urbanizada | 2,637 | 1 |

El uso de suelo predominante en las partes alta y media de la subcuenca es la cobertura vegetal natural, representada mayormente por los bosques de pino y el matorral submontano (tanto vegetación primaria como secundaria), mientras que en la parte baja de la subcuenca el uso de suelo preponderante es la agricultura de riego y temporal (Figuras 10 y 11).

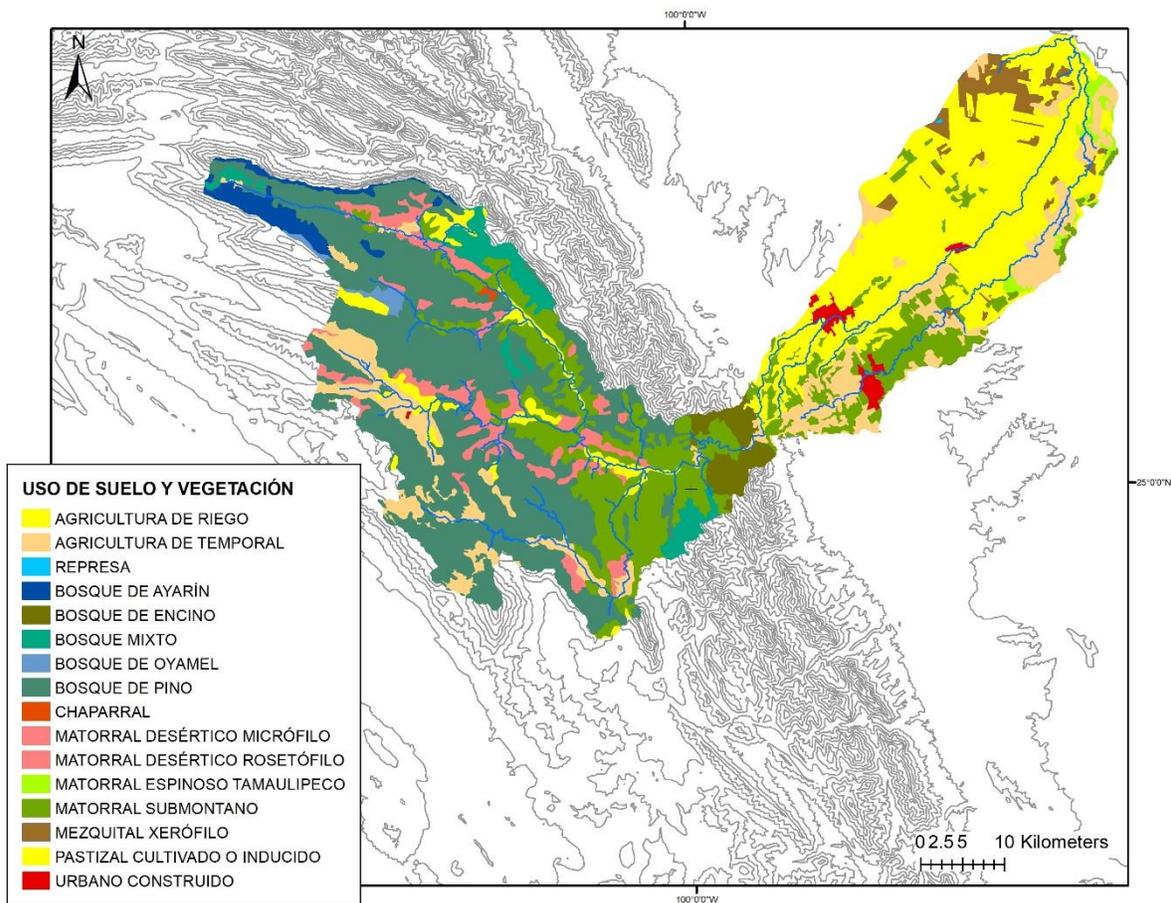


Figura 10. Uso de suelo y vegetación en la subcuenca del río Pílon

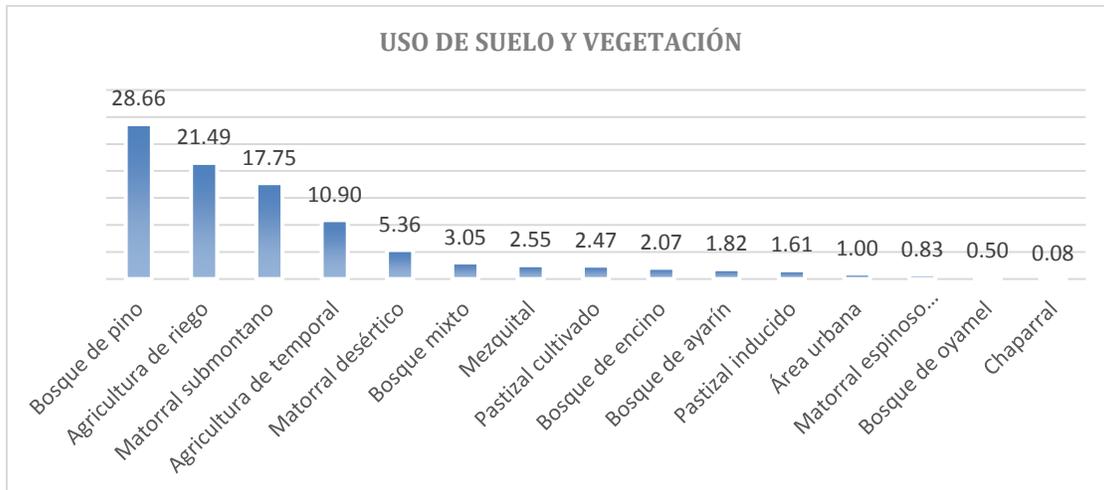


Figura 11. Porcentajes de cobertura territorial de los distintos tipos de uso de suelo en la subcuenca del río Pílon. Incluye la vegetación secundaria dentro de cada tipo de vegetación.

6.1.2.5.- Fauna silvestre e importancia ecológica

Algunas de las especies de fauna más relevantes son, en cuanto a mamíferos, el oso negro (*Ursus americanus eremicus*), el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), el coyote (*Canis latrans*), el puma (*Puma concolor*), el jaguar (*Panthera onca*), el pecarí (*Tayassu tajacu*), la zorra gris (*Urocyon cinereoargenteus*); en cuanto a aves, el halcón peregrino (*Falco peregrinus*), la cotorra serrana oriental (*Rhynchopsitta terrisi*), el carpintero bellotero (*Melanerpes formicivorum*), el correcaminos (*Geococcyx californianus*); en cuanto a reptiles, el camaleón de montaña (*Phrynosoma orbiculare*), la cascabel de las rocas (*Crotalus lepidus*), la coralillo (*Micrurus fulvius*), el falso escorpión (*Gerrhonotus infernalis*). Existen además muchas especies de anfibios y peces, e innumerables invertebrados (CCFFNL, 1995).

En la regionalización del territorio nacional desarrollada por la CONABIO (2000; 2010) siguiendo distintos parámetros de clasificación con fines de conservación de la biodiversidad, la subcuenca del Río Pílon forma parte de la Región Terrestre Prioritaria “El Potosí – Cumbres de Monterrey” y de la Región Hidrológica Prioritaria “Cumbres de Monterrey”; así mismo, dentro de su territorio se encuentran 5 Sitios Prioritarios Terrestres Para la

Conservación de la Biodiversidad, 4 de ellos de importancia alta y 1 de importancia extrema; se encuentran también más de 50 sitios prioritarios acuáticos epicontinentales (Figura 12).

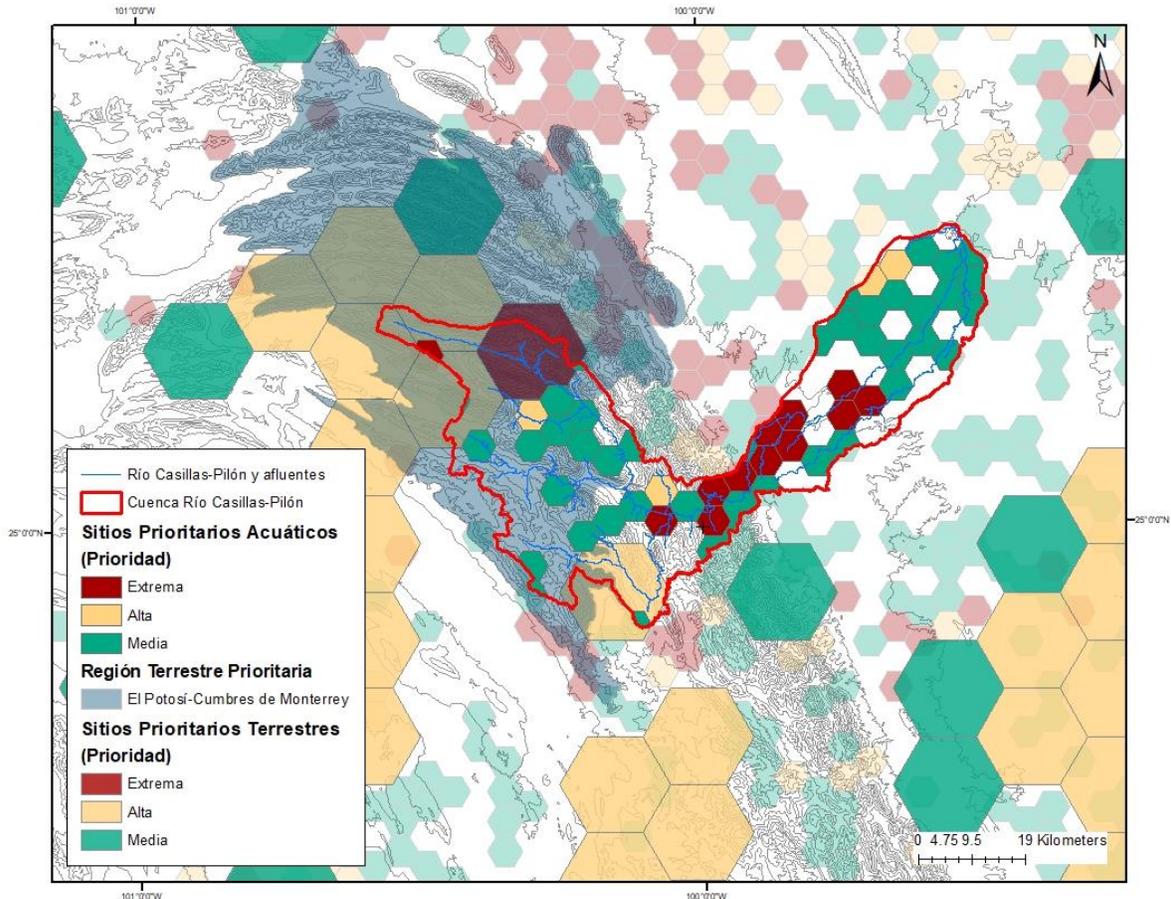


Figura 12. Sitios prioritarios acuáticos epicontinentales (polígonos pequeños) y sitios prioritarios terrestres para la conservación de la biodiversidad (polígonos grandes)

El Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF en inglés) incluye a la Cuenca Río Bravo – San Juan, de la cual forma parte la subcuenca del río Pilón, dentro de la ecorregión de “Cuencas endorreicas cerradas y xerófilas”, la cual es la segunda ecorregión xerófila neártica con mayor riqueza en especies de peces dulceacuícolas en México.

6.1.3. Red fluvial y estaciones hidrométricas

Las corrientes principales de la subcuenca son el río Casillas y el río Pílon (Figuras 13 y 14); se considera al primero como afluente del segundo, si bien ambos son tramos longitudinalmente continuos del mismo cauce.

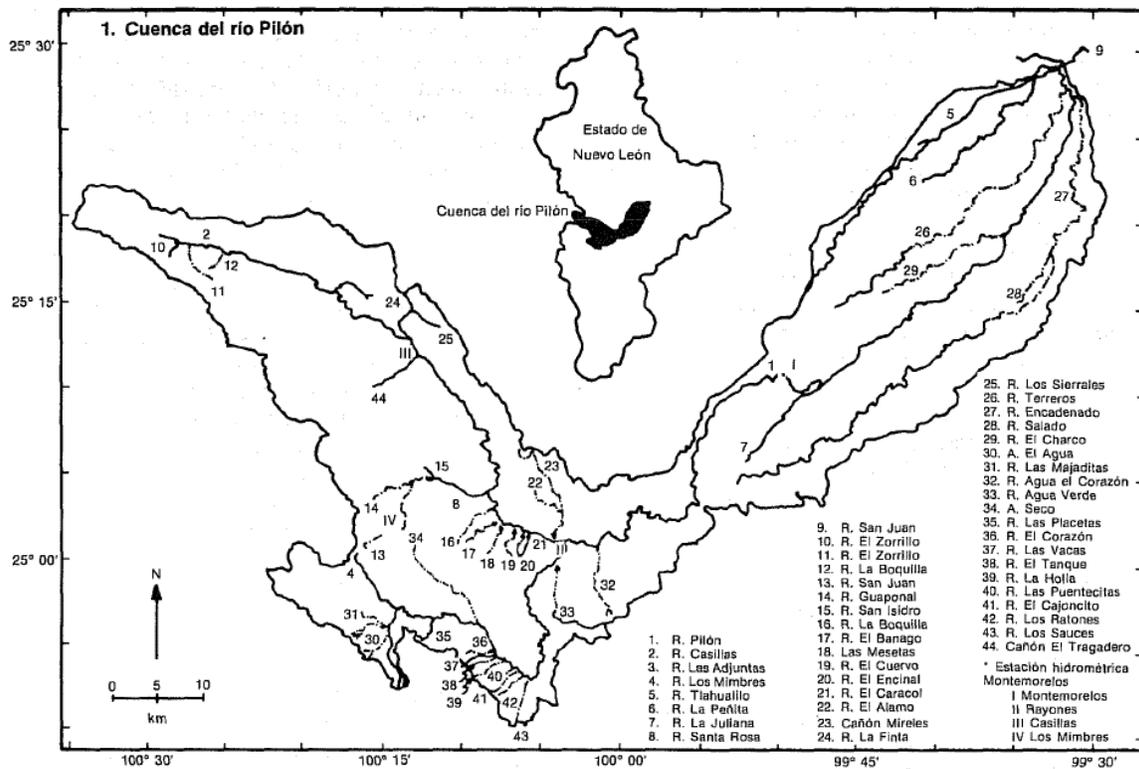


Figura 13. Toponimia fluvial de la subcuenca del río Pílon (tomado de Sánchez, 1987)

El río Casillas abarca la parte noroeste y oeste de la subcuenca, originándose en Coahuila en la cabecera de cuenca, desde donde avanza en sentido sureste, recibiendo en Nuevo León dos afluentes, el primero proveniente del cañón El Tragadero, lugar que popularmente es considerado como el nacimiento oficial del río Casillas, y el segundo proveniente del centro-oeste con el nombre de arroyo Santa Rosa.

El río Pílon toma este nombre como continuación del río Casillas a la altura de la cabecera municipal de Rayones, a partir de la confluencia del río Casillas con el arroyo Pílon, el cual

nace en la cabecera de cuenca del extremo suroeste de la misma. Continúa avanzando en sentido este, adentrándose en el cañón Puerta La Boca, por donde sale de la Gran Sierra Plegada hacia las Llanuras y Lomeríos, en donde conforma el denominado Valle del Pílon en la Región Citrícola. Finalmente descarga su caudal en el río San Juan, que más allá de la presa El Cuchillo, lo conduce hasta el río Bravo.

La longitud total del cauce alcanza los 181 km, con altitudes desde 2690 msnm a 185 msnm. La pendiente hidráulica oscila entre 0.136° a 0.363° en las Llanuras y Lomeríos; de 0.424° a 0.593° en el piedemonte; en la Gran Sierra Plegada alcanza los 5.710° (Sánchez, 1987).

La estación hidrométrica correspondiente al río Pílon es la “Montemorelos”, clave # 24192, la cual cuenta con registros que abarcan más de 60 años ininterrumpidos.

El caudal del río Pílon es mantenido por un flujo base que procede de tres manantiales principales identificados: los ojos de agua de El Tragadero; el afloramiento en el lecho del río Casillas; y un manantial en el centro del cañón Puerta La Boca (*ibid.*).

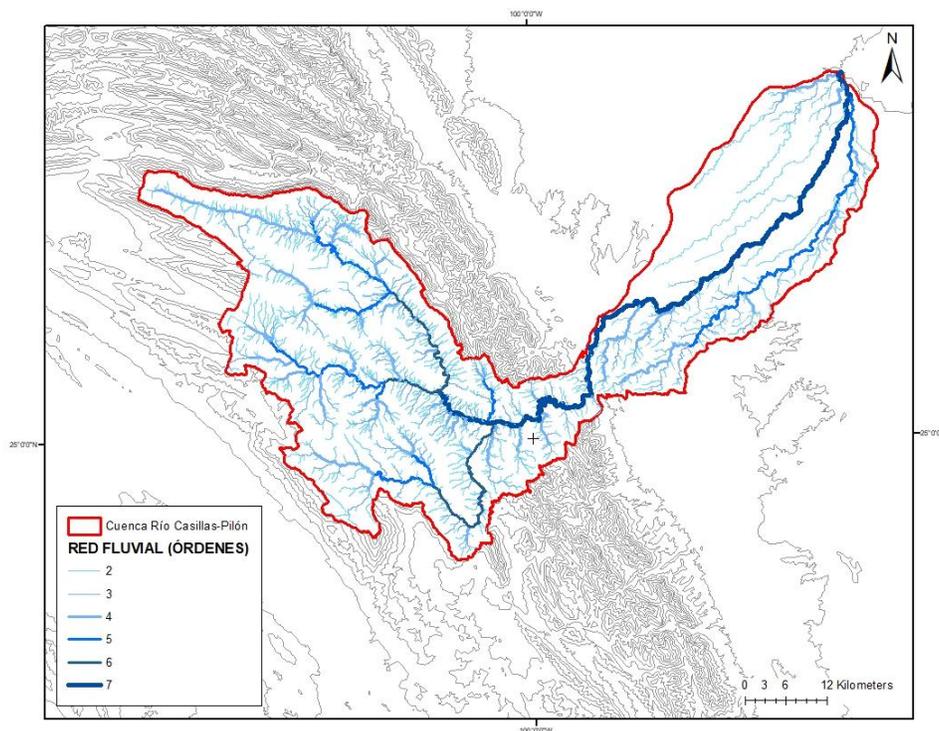


Figura 14. Red fluvial de la subcuenca del río Pílon

6.1.4.- Aspectos socioeconómicos

Las condiciones biofísicas contrastantes entre las partes alta-media y la parte baja de la subcuenca del río Pílon determinan la diferencia socioeconómica entre ambas regiones (Figura 15) (Antonio-Némiga *et al.*, 2006).

La parte baja, ocupada por los municipios Montemorelos y General Terán, se caracteriza por una topografía suave, suelo profundo (regosol y vertisol), clima estable (subhúmedo) y precipitación moderada (hasta 800 mm/año), por lo que cuenta con condiciones favorables para la actividad agropecuaria. La población tiene aquí un nivel de bienestar medio-alto, y las actividades se enfocan a la industria y al comercio.

Las partes alta y media, ocupadas por los municipios Rayones, Galeana y Arteaga, se caracterizan por una pendiente marcada, suelo somero (litosol y rendzina), clima extremoso (semiárido) y escasa precipitación (máximo 400 mm/año), por lo que son poco atractivas para el desarrollo agropecuario, excepto por algunas planicies y la margen de los ríos Casillas y Pílon. La población, menos numerosa, posee un nivel bajo de bienestar, y sus actividades son en general de autoempleo mal remunerado, enfocado a la extracción y procesamiento de productos no maderables y a la ganadería caprina; sin embargo, parte de la población se dedica a la producción de nuez, contándose con aproximadamente 60 mil árboles nogales pecaneros, de los cuales la mitad son variedades mejoradas por injertación y cuya producción estimada anual es de 600 toneladas; ésta es la actividad primordial agropecuaria llevada a cabo a lo largo de las márgenes de los ríos de la subcuenca (*ibid.*).

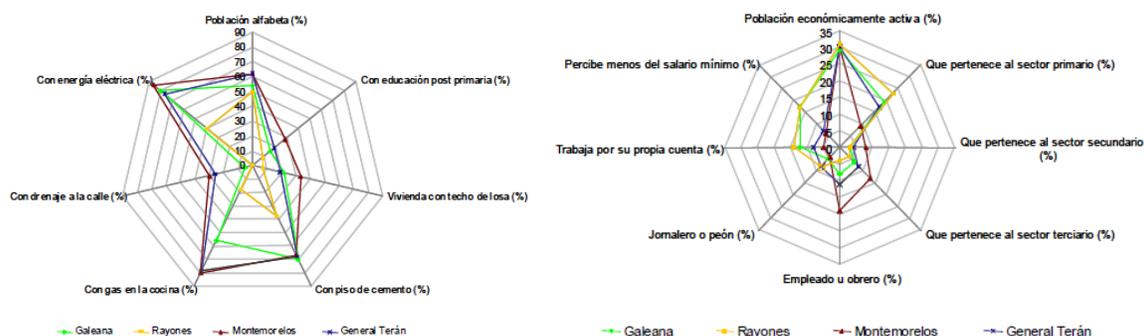


Figura 15. Cobertura de servicios (izquierda) y rasgos de producción y empleo (derecha) en los municipios de la subcuenca del río Pílon (tomado de Antonio-Némiga *et al.*, 2006)

6.2.- Metodología

6.2.1.- Determinación de ubicación y extensión del carrizo en la subcuenca

Con el fin de identificar y registrar la presencia del carrizo *Arundo donax* en las partes alta y media de la subcuenca del río Pílon, se realizaron recorridos en el área de estudio, cubriendo la totalidad de los fondos de valle y longitudes de las corrientes, así como sistemas artificiales de conducción superficial de agua, conocidos como “acequias” en la región, donde esta especie exótica pudiese encontrarse establecida.

Los recorridos se realizaron teniendo como punto de partida la cabecera de cuenca en el extremo noroeste de la misma, en el municipio de Arteaga, Coahuila, en concordancia con las recomendaciones (Coffman, 2007; CIPC, 2011) relativas al manejo del carrizo, que señalan la conveniencia de realizarse desde las cabeceras de cuenca y con dirección aguas abajo, siguiendo así la dirección de dispersión propia del carrizo.

Durante dichos recorridos se registraron mediante un receptor GPS, marca Garmin, modelo eTrex30, las coordenadas geográficas de ubicación de los carrizos encontrados, de la siguiente manera: cuando el carrizo encontrado era solitario, se marcaba su ubicación; cuando el carrizo se encontraba como un manchón o grupo semicircular, se marcaba su ubicación en el punto central aproximado de dicho manchón; cuando el carrizo se encontraba formando una franja longitudinal, se marcaban el punto central y los extremos de la misma.

Los recorridos se realizaron tanto sobre vehículo automotor como a pie; en vehículo se inspeccionaron aquellos tramos del fondo de valle principal de los ríos Casillas y Pílon que fuesen visibles claramente desde la carretera de terracería elevada y paralela respecto a los cauces de dichos ríos; a pie se inspeccionaron los tramos de los cauces distantes a la carretera o invisibles desde ésta, así como los sistemas de acequias, y cañones de corrientes tributarias, tales como El Tragadero, o la Cascada El Ancón, etc.; también se recorrieron a pie tramos del fondo de valle y la llanura aluvial cuya extensión en anchura impidiese realizar una inspección adecuada desde la carretera.

Los registros de ubicación se transfirieron a un sistema de información geográfica (SIG) para su procesamiento y visualización sobre distintos mapas temáticos preparados para el análisis del área de estudio.

6.2.2.- Caracterización hidrológica y geomorfológica del Río Casillas-Pilón

Con el fin de ordenar la información necesaria pertinente a variables hidrológicas y geomorfológicas fluviales para contrastarla con la información recopilada sobre la distribución del carrizo en la subcuenca, se realizará una clasificación tipológica de la unidad de estudio en unidades discretas, aplicando la Clasificación de Rosgen (1994) para ríos naturales.

Esta clasificación se basa en un procedimiento sistemático para jerarquizar unidades fluviales con base en la caracterización del paisaje circundante y del patrón o forma (perfil vertical), la pendiente (perfil longitudinal), la dimensión (perfil transversal) y el substrato de dichas unidades fluviales.

Este método presenta 4 niveles jerárquicos de clasificación, crecientes en detalle (Cuadro 6). Los niveles I y II tienen fines descriptivos, el nivel III tiene fines de planeación de acciones de manejo y restauración de ríos, y el nivel IV tiene fines de evaluación de dichas acciones.

Cuadro 6. Niveles jerárquicos de la Clasificación de Rosgen. Tomado de Rosgen (1994).

| NIVEL | INFORMACIÓN REQUERIDA | OBJETIVO |
|--|---|---------------------------------------|
| I <i>Caracterización geomorfológica general</i> | Geomorfología del paisaje, topografía, litología, suelos, climas, morfología de valle, perfil morfológico fluvial, patrón fluvial general | Categorizar ríos en tipos generales |
| II <i>Descripción morfológica</i> | Patrones de cauce, relación de atrincheramiento, relación ancho/profundidad, sinuosidad, substrato, pendiente | Categorizar ríos en tipos específicos |

| | | |
|--|---|---|
| <p style="text-align: center;">III <i>Condiciones de estabilidad del río</i></p> | <p style="text-align: center;">Vegetación riparia, patrones de deposición, patrones de meandramiento, rasgos de confinamiento, índices de hábitat para peces, régimen hidrológico, categorización de tamaño de río, presencia de detrito, índices de estabilidad de canal, erosionabilidad de taludes</p> | <p style="text-align: center;">Describir condiciones existentes que influyen la respuesta de canales a fuentes de cambio</p> |
| <p style="text-align: center;">IV <i>Verificación</i></p> | <p style="text-align: center;">Mediciones de transporte de sedimento, tasas de erosión de taludes, procesos de agradación/degradación, geometría hidráulica, y datos biológicos/ecológicos acuáticos y riparios</p> | <p style="text-align: center;">Recabar información específica de tramo sobre procesos fluviales, para la evaluación de acciones de manejo</p> |

Para los fines del presente trabajo, se caracterizó la unidad de estudio abarcando los niveles I y II.

La unidad de estudio se definió a partir de la red hidrográfica de las partes alta y media de la subcuenca con base en los resultados de la delimitación de la ubicación del carrizo (ver Figura 28 en sección “Resultados”). El criterio aplicado para la selección de las corrientes a conformar la unidad de estudio fue la presencia de carrizo en cualquier punto de su continuidad longitudinal.

La unidad de estudio así definida correspondió al cauce principal del río Casillas-Pilón, constituido por órdenes fluviales 5°, 6° y 7°, así como secciones limitadas de los afluentes El Tragadero y Las Joyas (Figura 16). Su longitud total es de 126 km.

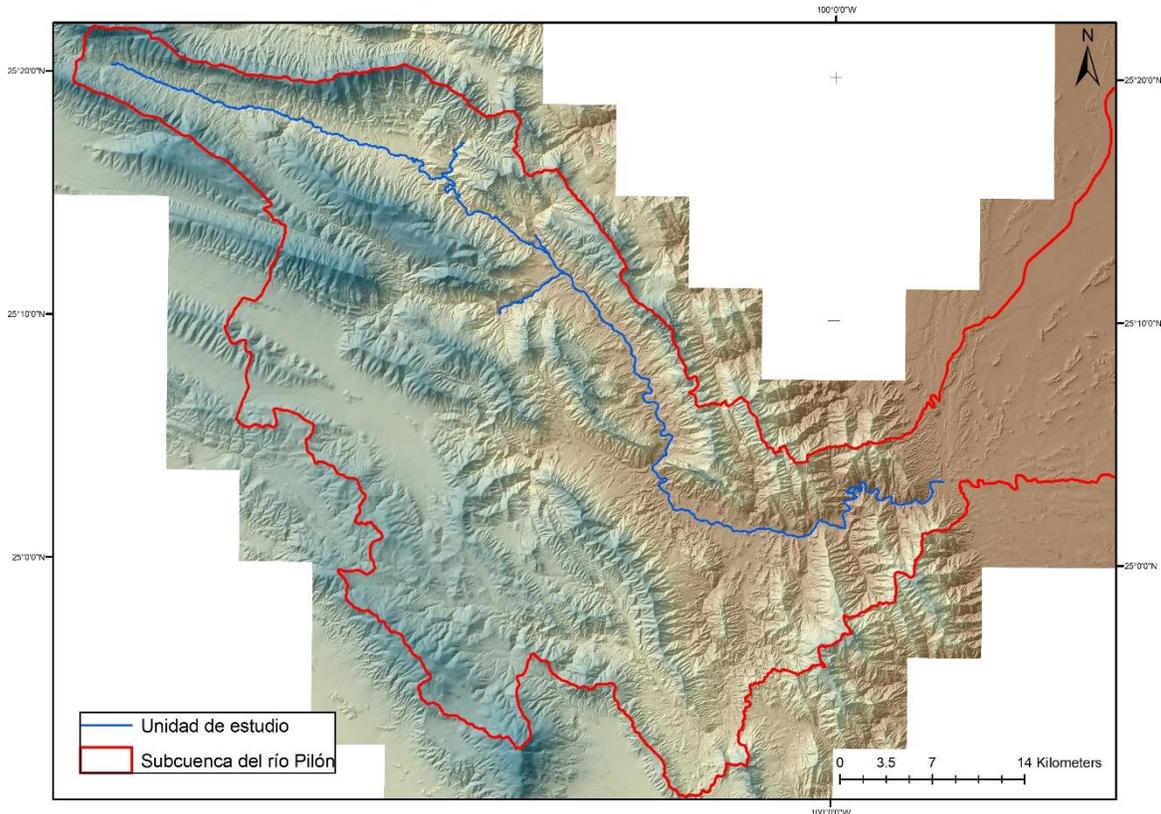


Figura 16. Unidad de estudio marcada en azul

La caracterización de las variables hidrológicas y geomorfológicas fluviales requeridas por cada nivel jerárquico, explicadas más adelante, se realizó en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Aquellas variables no caracterizables a través del SIG, se midieron en campo directamente. El material base utilizado para la visualización del área de estudio fueron modelos digitales de elevación de alta resolución LiDAR (formatos GRID y ASCII), escala 1:10000 y resolución de 5 m (INEGI, 2018). A partir del modelo de relieve de terreno, se construyó la red hidrográfica a utilizar para la caracterización, proceso durante el cual se aseguró la detección y eliminación de errores topológicos. Se descargaron de la base de datos en línea del INEGI (*ibid.*) los archivos en formato vectorial pertinentes a la temática requerida (geología, edafología, vegetación y uso de suelo, climas, regiones terrestres e hidrológicas prioritarias, sitios terrestres y acuáticos epicontinentales prioritarios) para la descripción del área de estudio, y se creó un mosaico de imágenes para su manipulación.

6.2.2.1.- Nivel I: caracterización morfológica generalizada

El nivel I permite la clasificación tipológica de la unidad de estudio con base en 9 tipos de tramos fluviales generales (Aa+, A, B, C, D, DA, E, F, G) a partir de la determinación de las siguientes variables observables a escala de paisaje: a) tipo de valle, b) pendiente del cauce, c) dimensión transversal, d) patrón o forma del cauce (Figura 17).

Para este nivel de caracterización, la unidad de estudio se subdividió en unidades discretas representadas por segmentos fluviales de 10 km de longitud de cauce, numerados desde aguas arriba con dirección al flujo de corriente. Se eligió esta longitud por considerarse representativa de la escala paisajística necesaria a que está sujeta la caracterización de variables a este nivel.

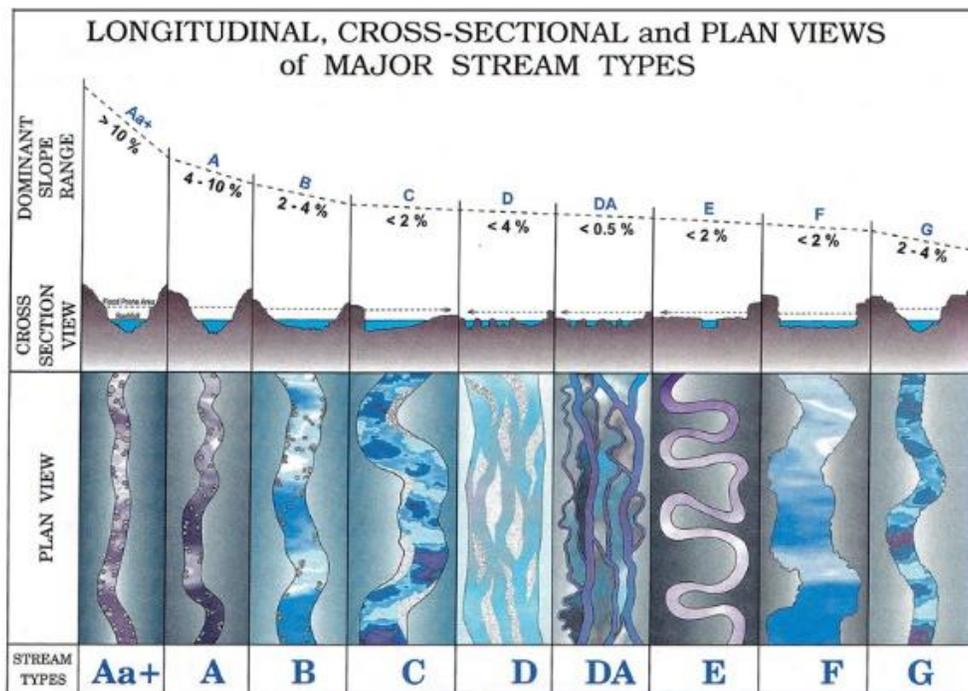


Figura 17. Perfiles longitudinal, transversal y vertical correspondientes a tipos de tramos fluviales caracterizables en el Nivel I. Tomado de Rosgen (1994).

Las variables fueron determinadas de la siguiente manera:

Tipo de valle. Empleando la herramienta *Terrain Profile* del SIG QGIS 3.2.0, se construyeron perfiles transversales del valle fluvial a escala de paisaje (Figura 18) en los puntos medios de cada segmento. La determinación del tipo de valle se realizó con base en los criterios morfológicos descritos en el Cuadro 7.

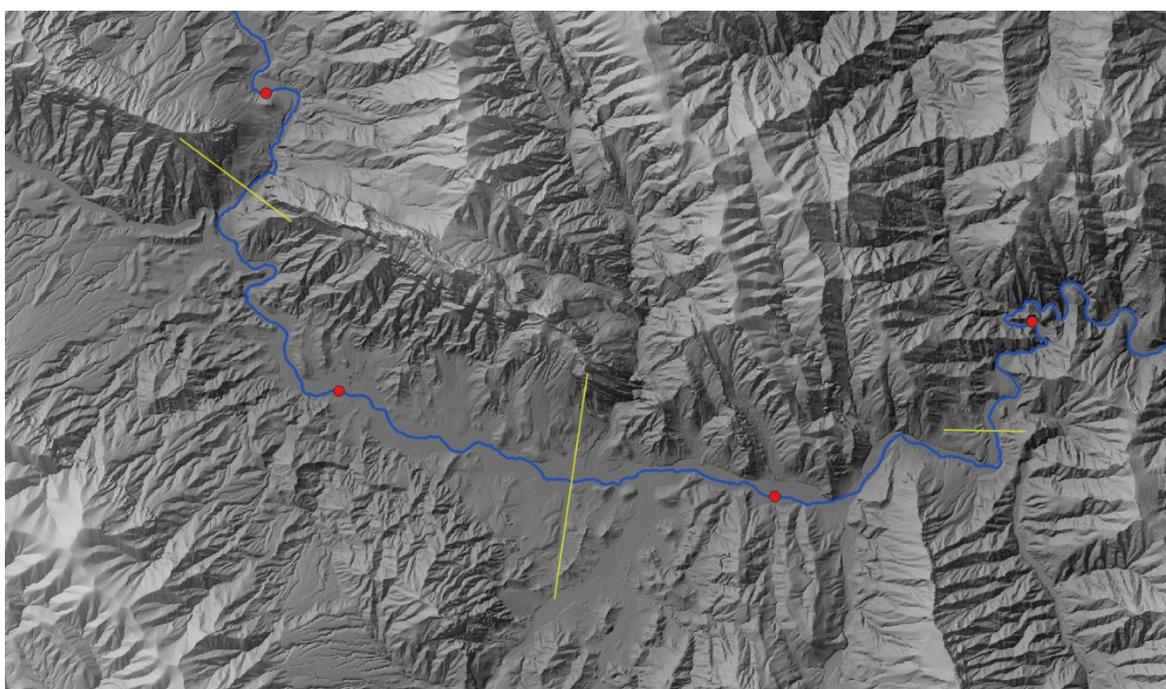
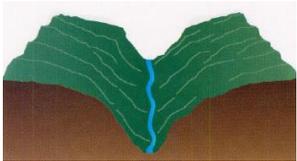
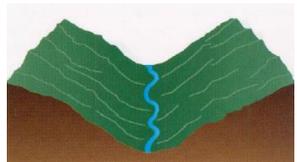
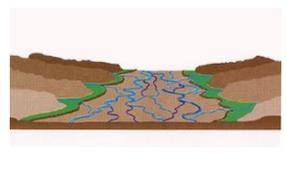


Figura 18. Ejemplo de trazado de perfiles transversales (líneas amarillas) en los puntos medios de los segmentos fluviales, a escala de paisaje, para la determinación de tipos de valle

Cuadro 7. Tipos de valle según Rosgen. Información de Endreny (2003) y EPA (2018).

| TIPO DE VALLE | CARACTERÍSTICAS | IMÁGEN |
|----------------------|---|---|
| I Valle en V | Substrato: roca madre / coluvial Laderas escarpadas. Pendiente > 2% Tipos fluviales A, G; escalón-poza y cascadas |  |
| II Valle coluvial | Substrato: coluvial / aluvial Laderas moderadas. Pendiente < 4% Tipo fluvial B (a veces G); rápidos |  |

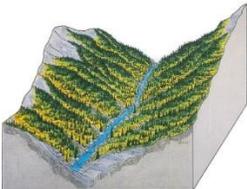
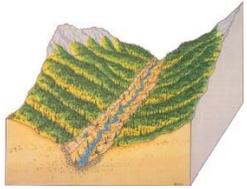
| | | |
|--|--|---|
| <p>III Abanicos aluviales</p> | <p>Pendiente > 2% Tipos A, B, G y D</p> |  |
| <p>IV Encañonado</p> | <p>Pendiente < 2% Tipo F (y C si el fondo de valle es ancho)</p> |  |
| <p>V Valle en U</p> | <p>Rasgos glaciales (morrenas) y terrazas Pendiente < 4% Tipos C, D, y G</p> |  |
| <p>VI Valle por falla geológica</p> | <p>Substrato: coluvial Pendiente < 4% Tipo B (C, F, y G)</p> |  |
| <p>VII Disectado</p> | <p>Substrato: coluvión / aluvión Cauces profundamente incisos Alta densidad de drenaje hidrográfico Tipos A y G</p> |  |
| <p>VIII Llanura aluvial con terrazas</p> | <p>Pendiente y relieve suaves. Terrazas aluviales múltiples; llanuras aluviales Tipos C y E (D, F y G)</p> |  |
| <p>IX De descarga glacial / aluvial</p> | <p>Ubicado en llanos en zonas costeras y tundras Tipos C y D</p> |  |
| <p>X Llanura aluvial</p> | <p>En zonas cercana a la costa. Muy baja pendiente, presencia de humedales y pantanos Tipos C, E y DA (G y F cuando canalizados)</p> |  |
| <p>XI Delta</p> | <p>En deltas de ríos Tipos DA y D (C y E)</p> |  |

Pendiente de cauce. Se construyó un perfil longitudinal de la unidad de estudio; se calculó la pendiente de cada segmento como un valor promedio, dividiendo la diferencia de altitud entre los dos extremos del segmento por su longitud.

Dimensión transversal. Se construyeron perfiles transversales de la unidad de estudio a escala de cauce, en cuatro puntos al azar de cada segmento. Se hizo una determinación aproximativa visual del tipo de dimensión con base en lo descrito en la Figura 16 y Cuadro 8.

Patrón o forma de cauce. Se determinó visualmente desde una perspectiva vertical la forma del cauce de cada segmento a escala de paisaje, tanto en la representación topográfica con curvas de nivel, como en el modelo digital de relieve de terreno, con base en lo descrito en la Figura 16.

Cuadro 8. Tipos de tramos fluviales según Rosgen. Información de Endreny (2003) y EPA (2018).

| TIPO DE TRAMO | CARACTERÍSTICAS | IMÁGEN |
|---------------|---|---|
| Aa+ | <p>Pendiente > 10% Angosto Baja / nula sinuosidad (< 1.2) Atrincherado (< 1.4) Relación A/P < 12 Escalón-pozas, cascadas</p> |  |
| A | <p>Pendiente 4 – 10 % Angosto Baja / nula sinuosidad (< 1.2) Atrincherados (< 1.4) Relación A/P < 12 Escalón-pozas, cascadas</p> |  |
| B | <p>Pendiente 2 – 4 % Algo ancho, valle mayor, sin llanura aluvial Moderada sinuosidad (> 1.2) Atrincheramiento moderado (1.4 – 2.2) Relación A/P > 12 Riffles; algunas pozas</p> |  |

| | | |
|----|--|---|
| C | <p>Pendiente < 2%</p> <p>Ancho, llanura aluvial, meandros</p> <p>Moderada / alta sinuosidad (> 1.2)</p> <p>Bajo atrincheramiento (> 2.2)</p> <p>Relación A/P > 12</p> <p>Riffles y pozas</p> |  |
| D | <p>Pendiente < 4%</p> <p>Más de 3 canales, trenzado, llanura aluvial</p> <p>Ancho y superficial</p> <p>Muy baja sinuosidad</p> <p>Sin atrincheramiento</p> <p>Relación A/P > 40</p> <p>Barras deposicionales</p> |  |
| DA | <p>Pendiente < 0.5 %</p> <p>Anastomosado, llanura aluvial</p> <p>Angosto y profundo</p> <p>Sinuosidad altamente variable</p> <p>Sin atrincheramiento,</p> <p>Relación A/P altamente variable</p> <p>Barras deposicionales</p> |  |
| E | <p>Pendiente < 2 %</p> <p>Angosto, llanura aluvial</p> <p>Alta sinuosidad (> 1.5)</p> <p>Bajo atrincheramiento (> 2.2)</p> <p>Relación A/P < 12</p> <p>Riffles y pozas</p> |  |
| F | <p>Pendiente < 2 %</p> <p>Ancho, llanura aluvial</p> <p>Moderada sinuosidad (> 1.2)</p> <p>Alto atrincheramiento (< 1.4)</p> <p>Relación A/P > 12</p> <p>Riffles y pozas</p> |  |
| G | <p>Pendiente 2 – 4 %</p> <p>Enbarrancado</p> <p>Moderada sinuosidad (> 1.2)</p> <p>Alto atrincheramiento (< 1.4)</p> <p>Relación A/P < 12</p> <p>Escalón – pozas</p> |  |

En la Figura 19 se muestra un ejemplo de determinación de las variables para el Nivel I.

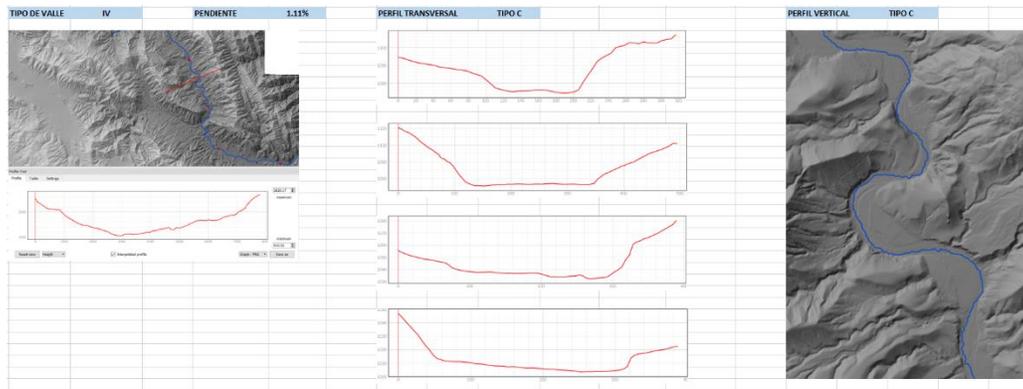


Figura 19. Ejemplo de determinación de variables para el Nivel I de la Clasificación de Rosgen

6.2.2.2.- Nivel II: descripción morfológica

El nivel II permite la clasificación de la unidad de estudio con base en 94 tipos de tramos fluviales a partir de la determinación de las siguientes variables: a) relación de atrincheramiento, b) relación anchura/profundidad, c) sinuosidad, d) pendiente, y e) substrato (Figura 20).

Para este nivel de caracterización, la unidad de estudio se subdividió en unidades discretas representadas por segmentos fluviales de 1 km de longitud de cauce, numerados desde aguas arriba con dirección al flujo de corriente. Se eligió esta longitud por considerarse como la distancia mínima necesaria para estimar la variable sinuosidad, así como por representar más de 20 veces el ancho del cauce a nivel *bankfull*.

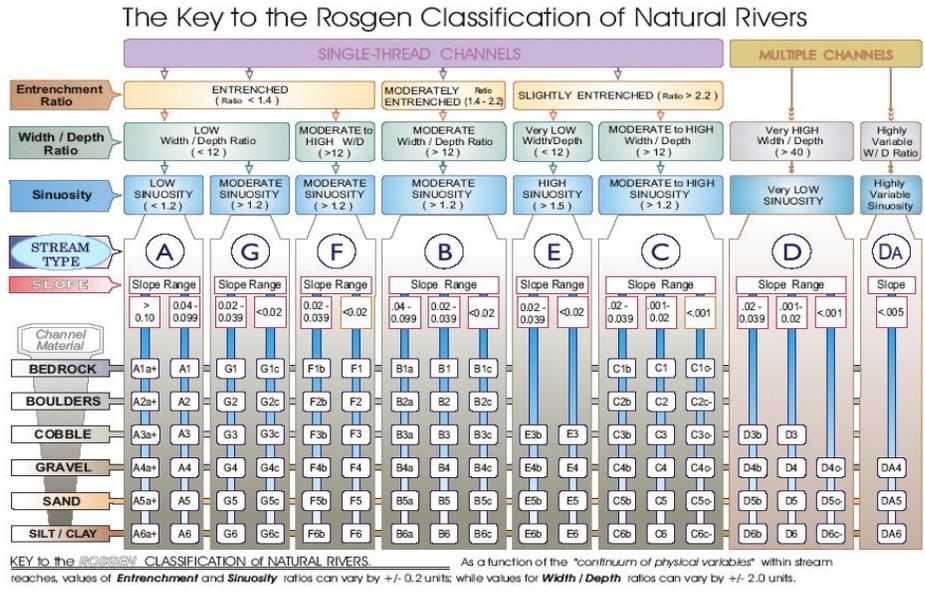


Figura 20. Variables para la clasificación de tipos fluviales a Nivel II. Tomado de Endreny (2003).

Las variables fueron determinadas de la siguiente manera:

Relación de atrincheramiento. La relación de atrincheramiento se determinó por la relación entre el ancho de la zona inundable a nivel de caudal de inundación y el ancho del cauce a nivel de caudal de desborde o *bankfull*, donde:

- El caudal de desborde o *bankfull* es aquél que ocupa totalmente el cauce sin pasar a la llanura de inundación. El caudal de desborde corresponde a un período de recurrencia o de retorno de 1.5 – 2 años.
- El caudal de inundación corresponde a un período de recurrencia o de retorno de 50 años, y equivale al doble de la profundidad máxima del caudal a nivel *bankfull*.

Se construyeron perfiles transversales a escala de cauce sobre los puntos medios de cada segmento (Figura 21) utilizando la herramienta *Terrain Profile* del SIG QGIS 3.2.0. El análisis observacional morfológico de los perfiles y la visualización conjunta de los segmentos correspondientes del cauce sobre el modelo digital de terreno (Figura 22),

permitió la determinación de las variables necesarias para la estimación de la relación de atrincheramiento.

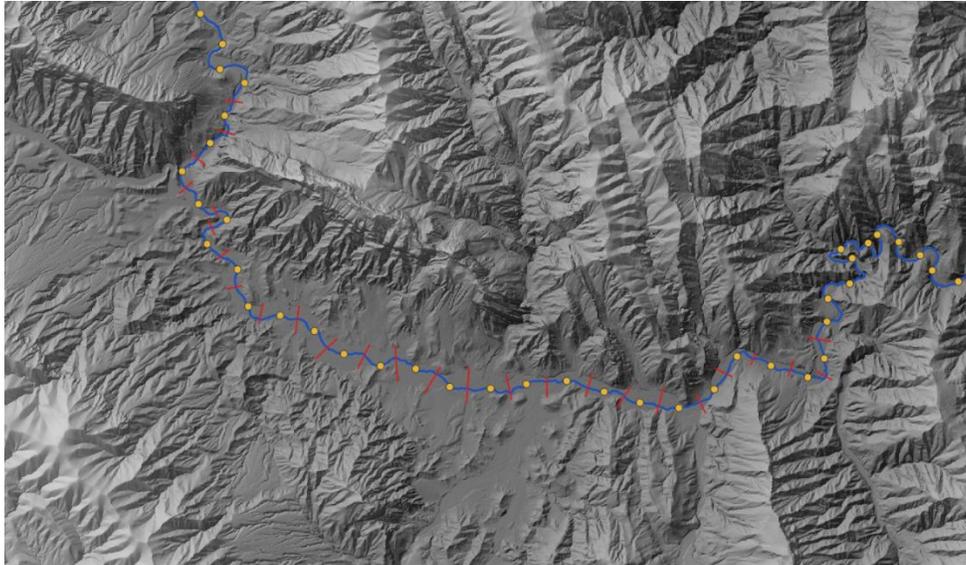


Figura 21. Ejemplo de trazado de perfiles transversales (líneas rojas) en los puntos medios de los segmentos fluviales, a escala de cauce, para la caracterización de variables

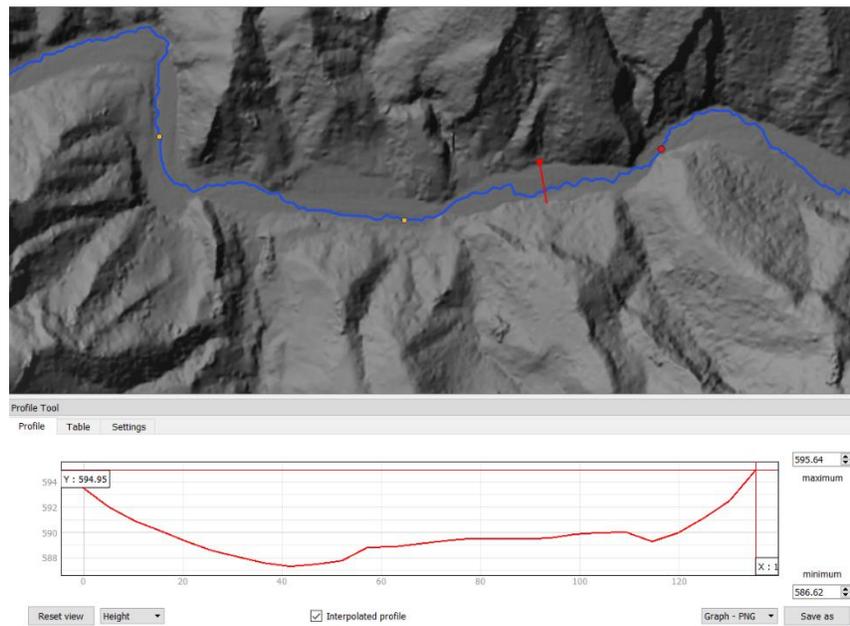


Figura 22. Ejemplo de trazado de perfil transversal a nivel de cauce con la herramienta *Terrain Profile* de QGIS 3.2.0

El nivel de caudal *bankfull* se identificó como (Figura 23):

- Correspondiente a la altura inmediatamente inferior a la llanura de inundación o aluvial adyacente, determinada como una extensión relativamente plana adyacente al cauce, representado éste en el perfil como la depresión visualmente coincidente con la corriente en el modelo digital de elevación.
- Correspondiente al punto de transición (identificable como un cambio marcado de pendiente altitudinal) entre las pendientes representantes los taludes del cauce, y las pendientes representantes la zona inundable.



Figura 23. Ejemplo de determinación de variables hidrológicas y geomorfológicas del segmento fluvial en el perfil transversal construido a nivel de cauce

Dicha identificación se corroboró empleando el método de Knighton (1984) para la estimación del nivel de caudal *bankfull* mediante el criterio geométrico. Este método se basa en el registro de altitud, anchura y profundidad de progresivos puntos de un cauce en su perfil transversal, graficando la relación ancho/profundidad contra la profundidad. En el gráfico resultante, el punto más bajo y representante un quiebre en la línea de unión en los puntos, representa el nivel del caudal *bankfull* (Figura 24).

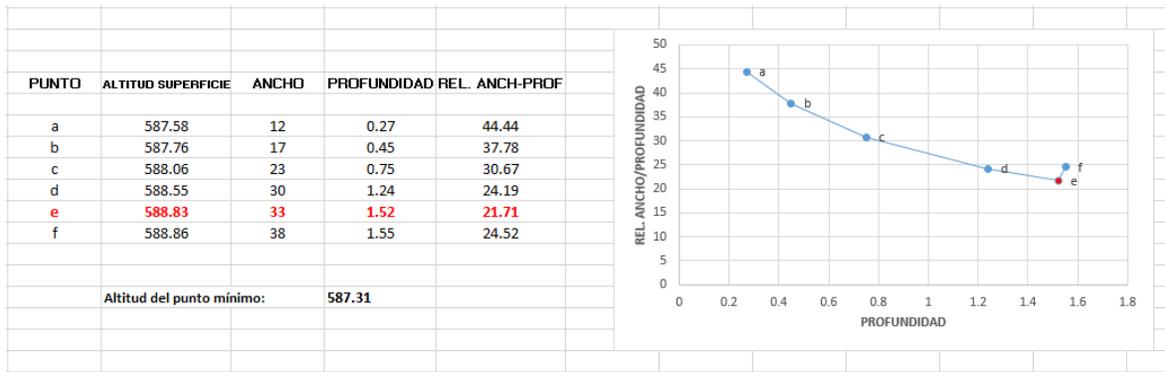


Figura 24. Criterio geométrico para estimar el nivel de caudal *bankfull*

Este método se respaldó con observaciones directas en campo, consistentes en la determinación visual del nivel de caudal *bankfull* con base en los siguientes indicadores: transición marcada o quiebre en la pendiente del talud del cauce principal; cambio en la distribución de tamaños de partículas entre el cauce y la zona de deposición adyacente; altura discerniblemente elevada de los depósitos recientes: barras de depósito y terrazas temporales; diferenciación marcada en la presencia/ausencia de vegetación anual/perenne.

El ancho del cauce a nivel *bankfull* se determinó en el perfil transversal como la distancia en metros entre los puntos determinados como el nivel de caudal *bankfull* a ambos lados del cauce.

El ancho de la zona inundable a nivel de caudal de inundación se determinó a la elevación correspondiente al doble de la profundidad máxima del cauce a nivel de caudal *bankfull*.

La profundidad máxima del cauce a nivel de caudal *bankfull* se determinó como la distancia entre el nivel de caudal *bankfull* y el punto de menor elevación en la sección del perfil transversal correspondiente al cauce.

Relación anchura/profundidad. Se determinó por la relación entre la anchura del canal a nivel de caudal *bankfull* y la profundidad promedio del cauce a nivel de caudal *bankfull*.

Para estimar la profundidad promedio, se dividió la anchura del canal en 10 segmentos iguales, midiéndose la profundidad de cada segmento a partir de su punto central. Las 10 mediciones se promediaron (Figura 25).

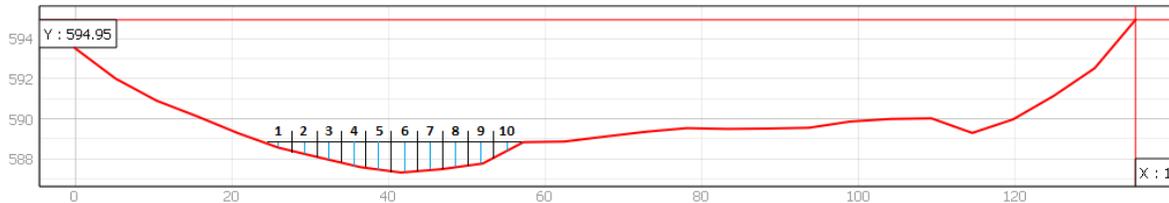


Figura 25. Ejemplo de división del ancho de cauce a nivel de caudal *bankfull* en 10 segmentos iguales para la medición de profundidades y estimación de la profundidad promedio

Sinuosidad. Se estimó el índice de sinuosidad por la relación entre el largo del cauce y el largo del valle que lo contiene. El largo de cauce fue constante en todos los segmentos, con base en la subdivisión hecha de la unidad de estudio en segmentos fluviales de 1 km de longitud de cauce. Una línea recta trazada entre ambos extremos de cada segmento representó la longitud del valle (Figura 26).

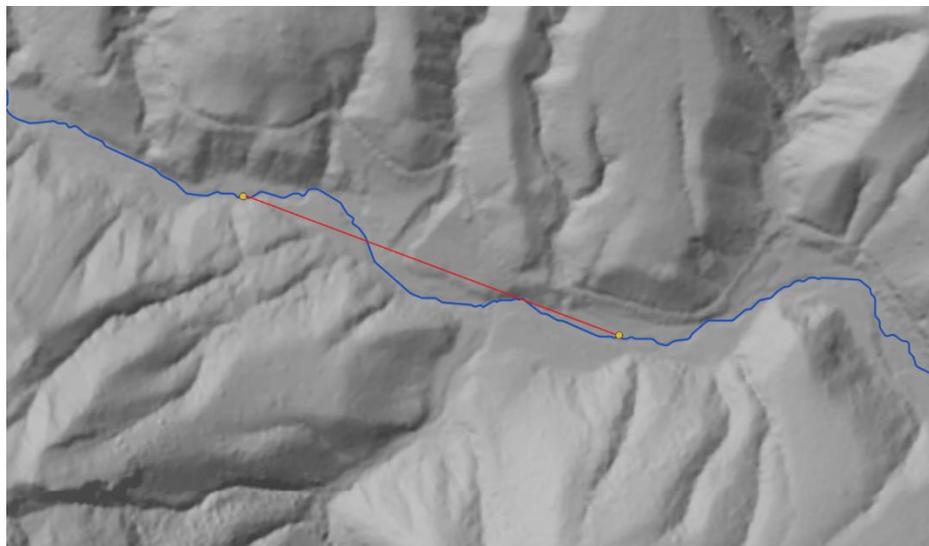


Figura 26. Ejemplo del trazado de puntos necesarios para la estimación del índice de sinuosidad

Substrato. El tipo de substrato del lecho de los segmentos fluviales se determinó con base en el tamaño dominante de partícula (D_{50}). Se siguió la metodología de Wolman (1954), modificada para un muestreo fotográfico del fondo del cauce en sentido perpendicular a la superficie empleando una cubeta muestreadora con fondo de vidrio transparente, diseñada y construida para esta aplicación por el autor del presente trabajo (Figura 27).

Las fotografías fueron procesadas utilizando el programa ArcGIS ArcMap 10.1, referenciándolas dimensionalmente al diámetro del fondo circular de la cubeta y midiendo el diámetro de las partículas del substrato a lo largo de su eje intermedio (Figura 28).



Figura 27. Muestreo de substrato de lecho mediante visualización directa con el muestreador

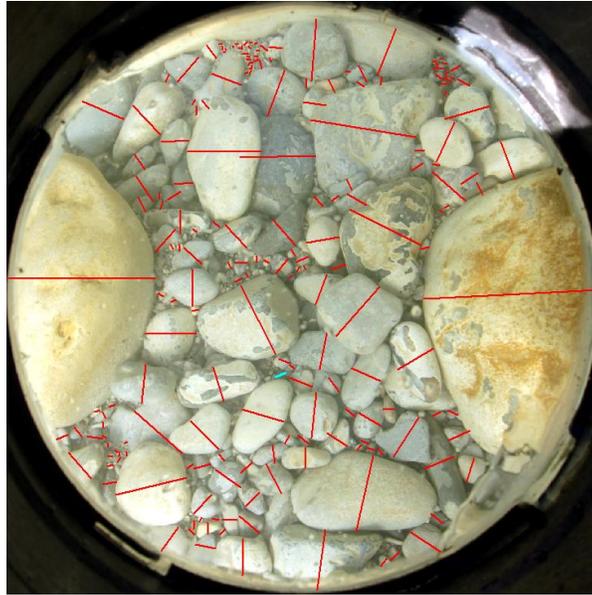


Figura 28. Ejemplo de medición del diámetro intermedio de partículas del sustrato

La clasificación por tamaños de las partículas de sedimento se basó en la escala de Wentworth (1922) (Cuadro 9), que establece las siguientes categorías:

Cuadro 9. Clases de sustrato (Wentworth, 1922) empleadas para la Clasificación de Rosgen

| SUBSTRATO | RANGO DE D ₅₀ (mm) |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| Roca madre | (sin tamaño) |
| Bolos (<i>Boulders</i>) | > 256 |
| Cantos (<i>Cobble</i>) | 64 – 256 |
| Grava (<i>Gravel</i>) | 2 – 64 |
| Arena (<i>Sand</i>) | 0.0062 – 2 |
| Limo / Arcilla (<i>Silt/Clay</i>) | < 0.0062 |

Mediante el análisis de los porcentajes acumulativos de los diámetros de las partículas se obtuvo el valor de D₅₀, el cual es representativo del tamaño dominante de partícula (Rosgen, 1994).

6.2.3.- Análisis estadístico

Empleando el programa estadístico SAS versión 9.4 se llevaron a cabo los siguientes análisis:

6.2.3.1.- Prueba de hipótesis nula

Se llevó a cabo una prueba de hipótesis nula para determinar si existe influencia de los tipos fluviales de Nivel II (en adelante denominados “subtipos fluviales”) sobre la presencia/ausencia de carrizo. El juego de hipótesis se manejó de la siguiente forma:

$$H_0: \beta = \mathbf{0} \qquad H_a = \text{al menos un } \beta_i \text{ es distinto a } 0$$

En donde H_0 = ningún tipo fluvial tiene influencia sobre la presencia/ausencia de carrizo

H_a = al menos un tipo fluvial tiene influencia sobre la presencia/ausencia de carrizo

Se empleó la Prueba de Wald al ser considerada la más conveniente en términos de potencia estadística (Agresti, 2002; Yi y Wang, 2011). Dicha prueba maneja un estadístico de prueba W (Chi-cuadrado de Wald) con distribución Chi-cuadrada:

$$W = (\beta - \beta_0)' [\text{cov}(\beta)]^{-1} (\beta - \beta_0)$$

La regla de decisión es como sigue:

$$\text{Si } W > \text{Constante} \Rightarrow \text{se rechaza } H_0$$

En el paquete estadístico SAS 9.4 la regla de decisión se maneja de forma equivalente como sigue:

Si $Pr < 0.05 \Rightarrow$ se rechaza H_0

6.2.3.2.- Estimación de probabilidades de presencia/ausencia de carrizo por subtipo fluvial

Las probabilidades de presencia/ausencia de carrizo para los subtipos fluviales se estimaron mediante la siguiente función de distribución logística:

$$P(Y = 1|x) = \frac{e(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1x_1 + \hat{\beta}_2x_2 + \hat{\beta}_3x_3 + \dots + \hat{\beta}_kx_k)}{1 + e(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1x_1 + \hat{\beta}_2x_2 + \hat{\beta}_3x_3 + \dots + \hat{\beta}_kx_k)}$$

en donde $\hat{\beta}$ = estimador
 x = subtipo fluvial

El modelo de regresión logística en que se basa la función es el siguiente:

$$\ln\left(\frac{P(Y = 1)}{1 - P(Y = 1)}\right) = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \dots + \beta_kx_k$$

en donde β = estimador
 x = subtipo fluvial

6.2.3.3.- *Estimación de influencia de variables hidrológicas-geomorfológicas en la presencia/ausencia de carrizo*

Se llevó a cabo una comparación de cocientes de disparidad (razón de momios) para determinar si algún criterio o variable en particular en comparación a los demás, tiene efecto significativo sobre la presencia/ausencia de carrizo. Se manejó un intervalo de confianza del 95 % como indicador del nivel de precisión de la estimación de efecto.

Si el intervalo de confianza estimado para una variable en particular no contiene al 1, se considera que dicha variable presenta significancia estadística. Si lo contiene, se considera que la variable no es estadísticamente significativa.

Para las variables continuas la comparación se basó en la siguiente expresión:

$$RM = \frac{\frac{P(Y = 0|m + 1)}{P(Y = 1|m + 1)}}{\frac{P(Y = 0|m)}{P(Y = 1|m)}}$$

en donde RM: razón de momios
 m: valor de la variable

Para las variables categóricas la comparación se basó en la siguiente expresión:

$$M = \frac{\frac{P(Y = 0|m)}{P(Y = 1|m)}}{\frac{P(Y = 0|n)}{P(Y = 1|n)}}$$

En donde m: variable categórica 1
 n: variable categórica 2

6.3.- *Materiales*

- Insumos informáticos:
 - Literatura científica para la elaboración del marco teórico y análisis de antecedentes
 - Bases de datos vectoriales de topografía, fisiografía, geología, climas, suelos, vegetación y uso de suelo, hidrología superficial, regiones terrestres e hidrológicas prioritarias, sitios terrestres prioritarios, sitios acuáticos epicontinentales prioritarios (CONABIO, 2000, 2010; INEGI, 2018)
 - Modelos digitales de elevación de alta resolución LiDAR (formatos GRID y ASCII), escala 1:10000 y resolución de 5 m (INEGI, 2018).
 - Datos hidrométricos (BANDAS) (IMTA, 2016)
 - Datos meteorológicos (ERIC III) (IMTA, 2016)

- Software:
 - Google Earth Pro
 - ArcGIS ArcMap 10.1
 - QGIS 3.2.0
 - Paquete estadístico R versión 3.5.1
 - Paquete estadístico SAS versiones 9.0 y 9.4
 - Microsoft Access, Excel, Word

- Herramientas
 - GPS Garmin eTrex30
 - Cubeta para muestreo fotográfico de substrato de lecho
 - Cinta métrica
 - Cámara fotográfica

7.- RESULTADOS

7.1.- Ubicación y extensión del carrizo en la subcuenca

El carrizo en el área de estudio se distribuye a lo largo de los cauces de los ríos Casillas y Pilón. Se registró además la presencia de carrizo en dos afluentes: el Tragadero y Las Joyas (Figura 29).

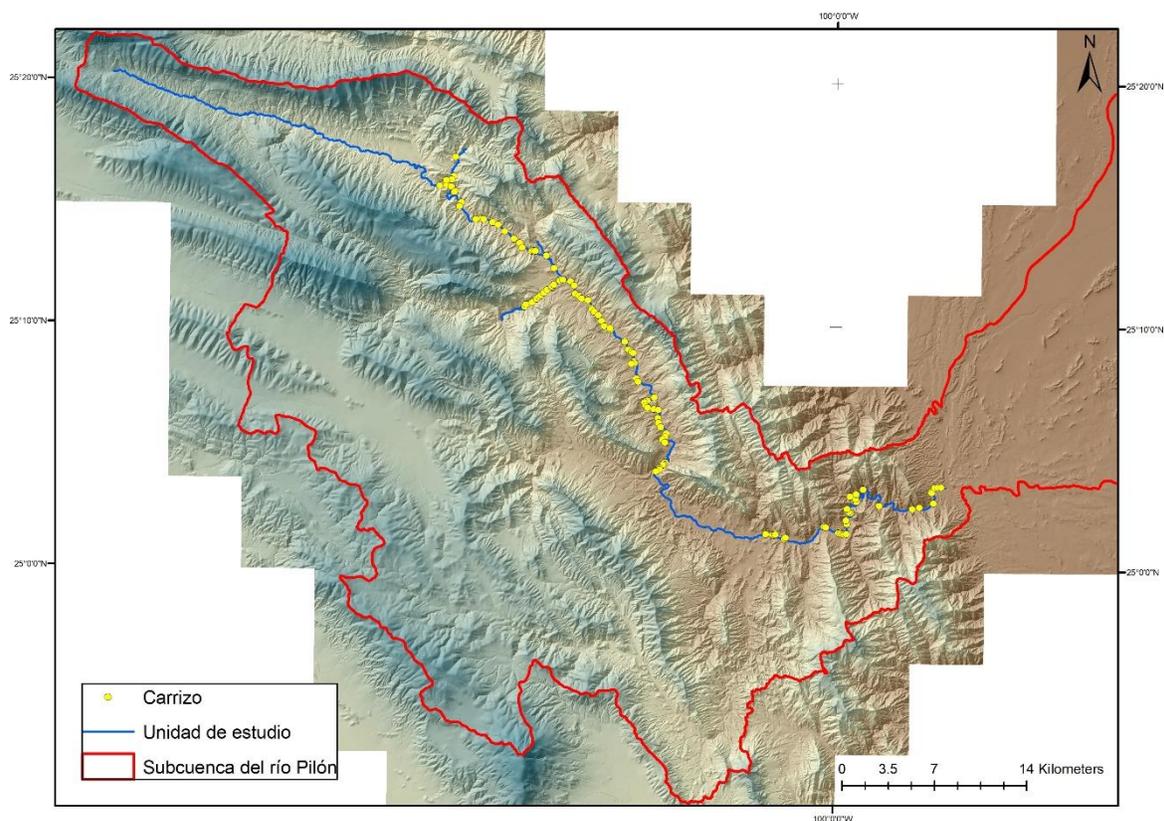


Figura 29. Puntos de ubicación del carrizo registrados para las partes alta y media de la subcuenca del río Pilón

En la Figura 30 se muestran dos fotografías ilustrativas del carrizo establecido a lo largo de la unidad de estudio.



Figura 30. Fotografías ilustrativas del carrizo establecido a lo largo de la unidad de estudio

7.2.- Caracterización hidrológica y geomorfológica del río Casillas-Pilón

7.2.1.- Nivel I: caracterización morfológica generalizada

En el cuadro 10 se muestra el resultado de la clasificación tipológica de Nivel I aplicada a la unidad de estudio. Ésta presenta tipos fluviales B, C, D y F, con un rango de pendiente de 3.37 % a 0.7 %, y tipos de valle II, III, IV y V.

Cuadro 10. Tipos fluviales y valores de variables determinados para el Nivel I de clasificación

| SEGMENTO | TIPO FLUVIAL | TIPO DE VALLE | PENDIENTE % |
|----------|--------------|---------------|-------------|
| 1 | B | II | 3.37 |
| 2 | B | II | 2.52 |
| 3 | C | V | 2.12 |
| 4 | C | V | 2.11 |
| 5 | C | V | 2.12 |
| 6 | D | III | 1.32 |
| 7 | C | IV | 1.11 |
| 8 | D | II | 1.02 |
| 9 | D | III | 1.04 |
| 10 | D | III | 1.02 |
| 11 | F | IV | 0.84 |
| 12 | F | IV | 0.7 |

NOTA: Los segmentos fluviales están numerados desde aguas arriba en dirección del flujo de corriente.

7.2.2.- Nivel II: descripción morfológica

En el cuadro 11 se muestra el resultado de la clasificación tipológica de Nivel II aplicada a la unidad de estudio. Ésta presenta tipos fluviales B, C, D y F, y subtipos fluviales B1, B3, B3a, B4, B4c, C3b, C4, C4b, D3, D4, D4b, F3b, F4 y F4b.

Cuadro 11. Clasificación fluvial y variables por segmento fluvial para el Nivel II de clasificación

| SEG. | TIPO FLUVIAL | SUBTIPO FLUVIAL | ATRINCH. | ANCHO/ PROF. | SIN. | PEND. | SUB. |
|------|--------------|-----------------|----------|--------------|------|-------|------|
| 1 | F | F3b | 1.32 | 27.54 | 1.21 | 0.055 | S3 |
| 2 | C | C3b | 2.64 | 20.1 | 1.24 | 0.038 | S3 |
| 3 | F | F4b | 1.35 | 22.08 | 1.22 | 0.035 | S4 |
| 4 | C | C4b | 2.63 | 14.34 | 1.19 | 0.030 | S4 |
| 5 | F | F4b | 1.65 | 34.48 | 1.3 | 0.031 | S4 |
| 6 | B | B4 | 1.7 | 15.87 | 1.27 | 0.031 | S4 |
| 7 | B | B4 | 1.9 | 16.29 | 1.19 | 0.028 | S4 |
| 8 | B | B4 | 1.76 | 27.87 | 1.33 | 0.026 | S4 |
| 9 | B | B4 | 2 | 10.16 | 1.22 | 0.032 | S4 |
| 10 | B | B4 | 2 | 58.54 | 1.09 | 0.028 | S4 |
| 11 | F | F4b | 1.26 | 54.17 | 1.17 | 0.026 | S4 |
| 12 | B | B4 | 1.79 | 19.72 | 1.14 | 0.023 | S4 |
| 13 | C | C4b | 2.68 | 21.84 | 1.3 | 0.025 | S4 |
| 14 | F | F4b | 1.23 | 16.46 | 1.43 | 0.030 | S4 |
| 15 | B | B4 | 1.4 | 22.99 | 1.16 | 0.024 | S4 |
| 16 | B | B4 | 2 | 20.24 | 1.18 | 0.027 | S4 |
| 17 | F | F4b | 1.18 | 58.46 | 1.09 | 0.024 | S4 |
| 18 | B | B4 | 2.08 | 12.34 | 1.13 | 0.024 | S4 |
| 19 | C | C4b | 2.26 | 31.51 | 1.26 | 0.023 | S4 |
| 20 | B | B4 | 1.95 | 49 | 1.26 | 0.020 | S4 |
| 21 | C | C4b | 2.25 | 27.91 | 1.34 | 0.021 | S4 |
| 22 | C | C4b | 3 | 87.32 | 1.2 | 0.021 | S4 |
| 23 | C | C4b | 7.69 | 28.05 | 1.16 | 0.021 | S4 |
| 24 | C | C4b | 6.06 | 42.86 | 1.15 | 0.022 | S4 |
| 25 | C | C4b | 2.72 | 78.73 | 1.34 | 0.021 | S4 |
| 26 | B | B4 | 1.45 | 46.32 | 1.13 | 0.021 | S4 |
| 27 | C | C4b | 4.09 | 54.22 | 1.13 | 0.020 | S4 |
| 28 | C | C4b | 2.16 | 61.11 | 1.23 | 0.020 | S4 |
| 29 | C | C4 | 3 | 44.74 | 1.18 | 0.019 | S4 |
| 30 | B | B4 | 1.82 | 65.52 | 1.72 | 0.021 | S4 |
| 31 | B | B4 | 1.86 | 42.72 | 1.41 | 0.025 | S4 |
| 32 | C | C4b | 4.72 | 90.91 | 2.12 | 0.025 | S4 |
| 33 | C | C4b | 2.6 | 42.86 | 1.22 | 0.023 | S4 |
| 34 | C | C4b | 3.88 | 30.77 | 1.18 | 0.020 | S4 |
| 35 | C | C4 | 2.7 | 51.16 | 1.1 | 0.018 | S4 |
| 36 | F | F4 | 1.43 | 34.92 | 1.69 | 0.018 | S4 |
| 37 | C | C4 | 2.26 | 23.28 | 3.32 | 0.019 | S4 |
| 38 | C | C4 | 3.8 | 25.88 | 1.27 | 0.019 | S4 |
| 39 | B | B4c | 1.86 | 25.17 | 1.44 | 0.019 | S4 |
| 40 | C | C4 | 3.29 | 46.97 | 1.06 | 0.021 | S4 |
| 41 | F | F4b | 1.17 | 24.43 | 1.18 | 0.025 | S4 |
| 42 | F | F4 | 1.28 | 39 | 1.08 | 0.018 | S4 |
| 43 | C | C4b | 2.18 | 51.28 | 1.3 | 0.020 | S4 |
| 44 | C | C4b | 2.17 | 103.45 | 1.08 | 0.021 | S4 |
| 45 | B | B4 | 1.82 | 56.9 | 1.13 | 0.023 | S4 |
| 46 | C | C4b | 2.84 | 52.33 | 1.07 | 0.022 | S4 |
| 47 | F | F4b | 1.48 | 28.42 | 1.4 | 0.022 | S4 |
| 48 | D | D4b | 8.20 | 120.45 | 1.13 | 0.020 | S4 |
| 49 | D | D4b | 8.42 | 120.80 | 1.08 | 0.020 | S4 |
| 50 | D | D4 | 8.16 | 122.42 | 1.1 | 0.018 | S4 |
| 51 | D | D3 | 8.31 | 121.76 | 1.15 | 0.016 | S3 |
| 52 | D | D3 | 8.38 | 121.40 | 1.16 | 0.013 | S3 |
| 53 | D | D3 | 8.30 | 122.38 | 1.21 | 0.015 | S3 |
| 54 | D | D4 | 8.42 | 123.56 | 1.09 | 0.012 | S4 |
| 55 | D | D4 | 8.28 | 122.50 | 1.14 | 0.014 | S4 |
| 56 | D | D4 | 8.26 | 124.39 | 1.15 | 0.014 | S4 |
| 57 | D | D4 | 8.36 | 123.92 | 1.23 | 0.010 | S4 |
| 58 | D | D4 | 8.40 | 122.62 | 1.14 | 0.011 | S4 |
| 59 | D | D4 | 8.48 | 121.55 | 1.14 | 0.012 | S4 |
| 60 | D | D4 | 8.42 | 120.80 | 1.17 | 0.011 | S4 |
| 61 | C | C4 | 4.7 | 43.51 | 1.27 | 0.011 | S4 |
| 62 | C | C4 | 3.58 | 47.5 | 1.24 | 0.011 | S4 |

| | | | | | | | |
|-----|---|-----|------|--------|------|-------|----|
| 63 | D | D4 | 8.66 | 122.77 | 1.15 | 0.011 | S4 |
| 64 | C | C4 | 2.34 | 38.93 | 1.24 | 0.011 | S4 |
| 65 | C | C4 | 4.23 | 28.97 | 1.36 | 0.011 | S4 |
| 66 | C | C4 | 2.36 | 38.6 | 1.3 | 0.011 | S4 |
| 67 | C | C4 | 2.66 | 26.45 | 1.42 | 0.010 | S4 |
| 68 | C | C4 | 2.7 | 101.67 | 1.18 | 0.008 | S4 |
| 69 | C | C4 | 2.34 | 44.09 | 1.17 | 0.012 | S4 |
| 70 | C | C4 | 1.57 | 96.23 | 1.75 | 0.011 | S4 |
| 71 | B | B4c | 1.57 | 36.96 | 1.57 | 0.010 | S4 |
| 72 | F | F4 | 1.34 | 42.68 | 1.15 | 0.009 | S4 |
| 73 | C | C4 | 3.63 | 20.27 | 1.42 | 0.010 | S4 |
| 74 | C | C4 | 2.5 | 35.71 | 1.11 | 0.008 | S4 |
| 75 | D | D4 | 8.79 | 123.60 | 1.21 | 0.010 | S4 |
| 76 | D | D4 | 9.20 | 122.50 | 1.36 | 0.010 | S4 |
| 77 | D | D4 | 8.88 | 120.44 | 1.41 | 0.010 | S4 |
| 78 | D | D4 | 9.10 | 120.58 | 1.11 | 0.010 | S4 |
| 79 | D | D4 | 9.28 | 122.58 | 1.15 | 0.009 | S4 |
| 80 | D | D4 | 8.76 | 124.20 | 1.33 | 0.010 | S4 |
| 81 | D | D4 | 8.54 | 123.90 | 1.17 | 0.010 | S4 |
| 82 | D | D4 | 8.10 | 122.71 | 1.18 | 0.010 | S4 |
| 83 | D | D4 | 8.46 | 125.10 | 1.15 | 0.010 | S4 |
| 84 | D | D4 | 8.43 | 124.90 | 1.25 | 0.009 | S4 |
| 85 | D | D4 | 8.74 | 124.93 | 1.15 | 0.010 | S4 |
| 86 | D | D4 | 9.07 | 125.23 | 1.08 | 0.011 | S4 |
| 87 | D | D4 | 9.28 | 125.20 | 1.22 | 0.009 | S4 |
| 88 | D | D4 | 8.85 | 125.53 | 1.09 | 0.011 | S4 |
| 89 | D | D4 | 8.61 | 124.73 | 1.13 | 0.009 | S4 |
| 90 | D | D4 | 8.22 | 125.80 | 1.18 | 0.010 | S4 |
| 91 | D | D4 | 8.18 | 125.67 | 1.12 | 0.011 | S4 |
| 92 | D | D4 | 8.77 | 120.40 | 1.11 | 0.010 | S4 |
| 93 | D | D4 | 9.06 | 120.89 | 1.1 | 0.011 | S4 |
| 94 | D | D4 | 8.67 | 121.23 | 1.25 | 0.010 | S4 |
| 95 | D | D4 | 9.18 | 122.41 | 1.14 | 0.008 | S4 |
| 96 | C | C4 | 3.18 | 54.05 | 1.76 | 0.009 | S4 |
| 97 | D | D4 | 8.48 | 122.40 | 1.2 | 0.010 | S4 |
| 98 | C | C4 | 2.48 | 56.47 | 1.91 | 0.010 | S4 |
| 99 | C | C4 | 2.3 | 25.84 | 1.67 | 0.010 | S4 |
| 100 | C | C4 | 1.57 | 21.1 | 1.73 | 0.009 | S4 |
| 101 | C | C4 | 2.07 | 51.85 | 3.04 | 0.011 | S4 |
| 102 | B | B4c | 1.62 | 41.49 | 1.57 | 0.009 | S4 |
| 103 | F | F4 | 1.55 | 86.11 | 3.6 | 0.008 | S4 |
| 104 | C | C4 | 3.61 | 48 | 1.94 | 0.008 | S4 |
| 105 | B | B4c | 2.09 | 68.09 | 1.75 | 0.008 | S4 |
| 106 | F | F4 | 1.25 | 60.4 | 2.28 | 0.008 | S4 |
| 107 | C | C4 | 2.36 | 34.15 | 1.56 | 0.006 | S4 |
| 108 | C | C4 | 3.17 | 42.65 | 1.84 | 0.008 | S4 |
| 109 | F | F4 | 1.57 | 73.44 | 1.18 | 0.008 | S4 |
| 110 | C | C4 | 3.27 | 33 | 1.15 | 0.007 | S4 |
| 111 | C | C4 | 3.1 | 83.67 | 1.31 | 0.006 | S4 |
| 112 | F | F4 | 1.78 | 80 | 1.14 | 0.006 | S4 |
| 113 | F | F4 | 1.91 | 43.31 | 1.17 | 0.007 | S4 |
| 114 | F | F4 | 1.7 | 114.06 | 1.2 | 0.005 | S4 |
| 115 | B | B1 | 1.61 | 18.56 | 1.19 | 0.030 | S1 |
| 116 | F | F3b | 1.28 | 45.54 | 1.71 | 0.050 | S3 |
| 117 | F | F4b | 1.29 | 27.63 | 1.18 | 0.020 | S4 |
| 118 | F | F4b | 1.32 | 23.81 | 1.85 | 0.020 | S4 |
| 119 | C | C4 | 2.76 | 37.78 | 2.7 | 0.010 | S4 |
| 120 | F | F4b | 1.08 | 28.92 | 1.22 | 0.030 | S4 |
| 121 | F | F4b | 1.44 | 39.71 | 1.16 | 0.030 | S4 |
| 122 | B | B3a | 1.53 | 12.09 | 1.55 | 0.040 | S3 |
| 123 | B | B3 | 1.48 | 22.76 | 1.13 | 0.020 | S3 |
| 124 | C | C4 | 3.96 | 40.77 | 1.11 | 0.020 | S4 |
| 125 | C | C4 | 4.43 | 48.89 | 1.14 | 0.020 | S4 |
| 126 | D | D4 | 8.21 | 120.02 | 1.17 | 0.020 | S4 |

SEG. (segmento fluvial), ATRINCH. (relación de atrincheramiento), ANCHO/PROF. (relación ancho/profundidad), SIN. (sinuosidad), PEND. (pendiente), SUB. (substrato): S1- Roca madre, S2- Bolos, S3- Cantos, S4- Grava, S5- Arena, S6- Limo/Arcilla.

En la Figura 31 se muestran las frecuencias de los tipos fluviales que conforman la unidad de estudio.

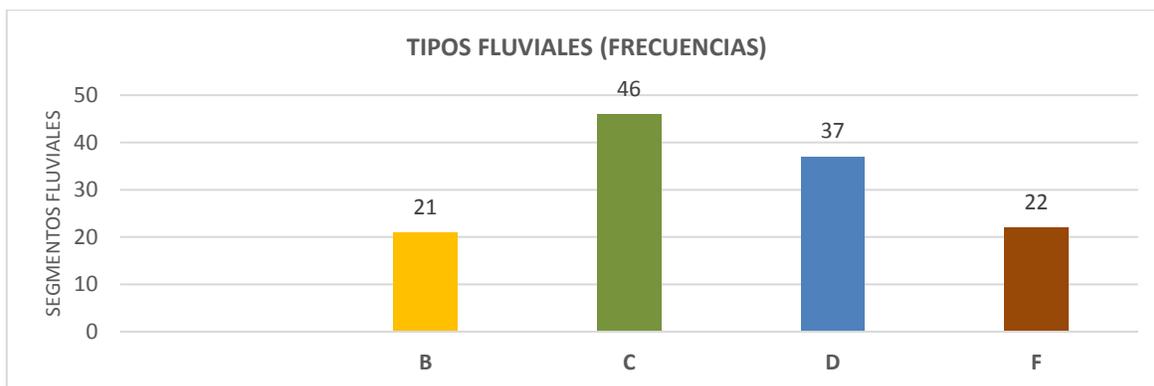


Figura 31. Frecuencias absolutas de tipos fluviales en la unidad de estudio

En la Figura 32 se muestran las frecuencias de los subtipos fluviales que conforman la unidad de estudio.

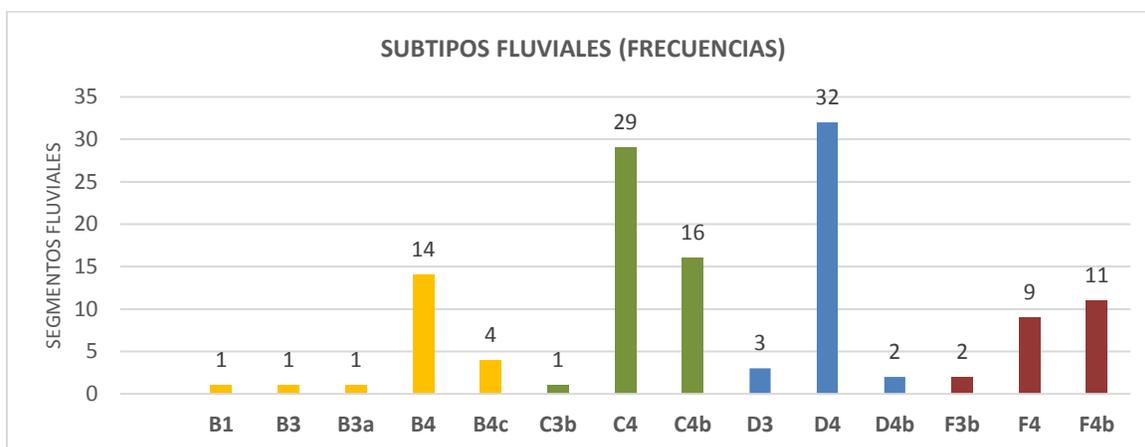


Figura 32. Frecuencias absolutas de subtipos fluviales en la unidad de estudio

7.3.- Análisis estadístico

7.3.1.- Frecuencias

Las frecuencias de carrizo muestran de forma general un patrón semejante al de las frecuencias de tipos y subtipos fluviales en la unidad de estudio (Figuras 33 y 34).

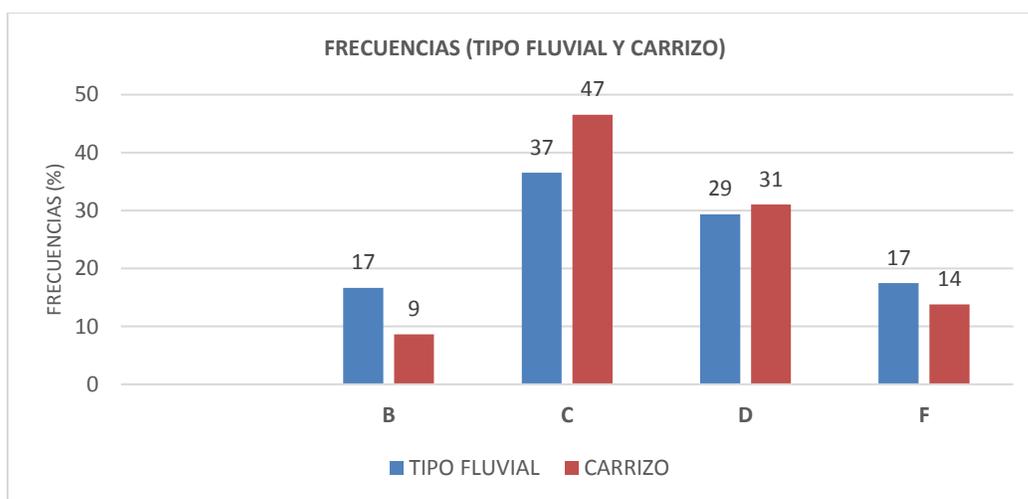


Figura 33. Comparación de frecuencias relativas de tipos fluviales y carrizo por tipo fluvial

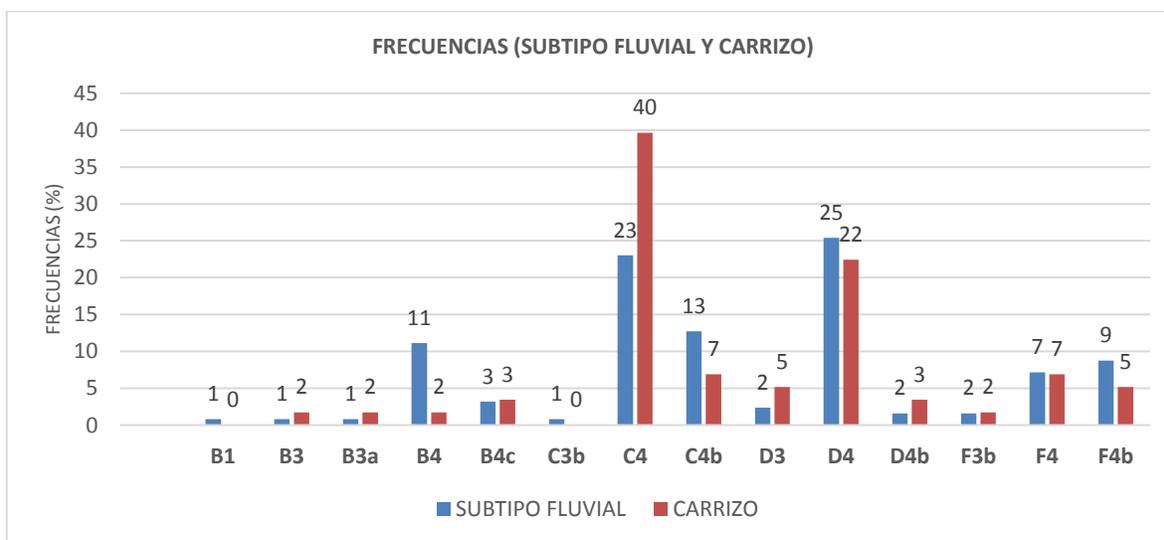


Figura 34. Comparación de frecuencias relativas de subtipos fluviales y carrizo por subtipo fluvial

7.3.2.- Prueba de hipótesis nula

El resultado de la prueba de Wald indica que el subtipo fluvial sí tiene influencia ($Pr = 0.02$) en la presencia/ausencia de carrizo en la unidad de estudio, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa (Cuadro 12).

Cuadro 12. Resultado de la prueba de Wald: significancia de la variable independiente STFLUV (subtipo fluvial) sobre la variable dependiente CARRIZO

| ANÁLISIS DE EFECTOS | | | |
|---------------------|----|----------------------|------------|
| Efecto | DF | Chi-cuadrado de Wald | Pr > ChiSq |
| STFLUV | 11 | 22.3533 | 0.0218 |

7.3.3.- Probabilidades de presencia/ausencia de carrizo por subtipo fluvial

Los estimadores de cada subtipo fluvial empleados en la estimación de probabilidad se muestran en el Cuadro 13. Los subtipos fluviales B1 y C3b no se incluyeron en las estimaciones al presentar 0 observaciones en la presencia de carrizo.

Cuadro 13. Estimadores calculados para los subtipos fluviales

| Parámetro | DF | Estimador | Error estándar | Chi-cuadrado de Wald | Pr > ChiSq |
|------------|----|-----------|----------------|----------------------|------------|
| Intercept | 1 | 0.8873 | 0.6633 | 1.7892 | 0.1810 |
| STFLUV B3 | 1 | -2.0521 | 2.4408 | 0.7069 | 0.4005 |
| STFLUV B3a | 1 | -2.0521 | 2.4408 | 0.7069 | 0.4005 |
| STFLUV B4 | 1 | 1.3099 | 1.1107 | 1.3909 | 0.2383 |
| STFLUV B4c | 1 | -0.8873 | 1.2000 | 0.5467 | 0.4597 |
| STFLUV C4 | 1 | -2.1725 | 0.8020 | 7.3379 | 0.0068 |
| STFLUV C4b | 1 | 0.1344 | 0.8724 | 0.0237 | 0.8776 |
| STFLUV D3 | 1 | -2.8332 | 1.8675 | 2.3016 | 0.1292 |
| STFLUV D4 | 1 | -0.5196 | 0.7545 | 0.4742 | 0.4911 |
| STFLUV D4b | 1 | -2.4967 | 2.0100 | 1.5430 | 0.2142 |
| STFLUV F3 | 1 | -0.8873 | 1.5621 | 0.3227 | 0.5700 |
| STFLUV F4 | 1 | -0.6866 | 0.9428 | 0.5303 | 0.4665 |
| STFLUV F4b | 0 | 0 | . | . | . |

Las probabilidades de presencia/ausencia de carrizo estimadas para cada subtipo fluvial se muestran en el Cuadro 14 y la Figura 35.

Cuadro 14. Probabilidades de presencia/ausencia de carrizo por subtipo fluvial

| SUBTIPO FLUVIAL | PROBABILIDAD (CARRIZO) | |
|-----------------|------------------------|----------|
| | PRESENCIA | AUSENCIA |
| B3 | 0.76 | 0.24 |
| B3a | 0.76 | 0.24 |
| B4 | 0.10 | 0.90 |
| B4c | 0.50 | 0.50 |
| C4 | 0.78 | 0.22 |
| C4b | 0.26 | 0.74 |
| D3 | 0.87 | 0.13 |
| D4 | 0.41 | 0.59 |
| D4b | 0.83 | 0.17 |
| F3 | 0.50 | 0.50 |
| F4 | 0.45 | 0.55 |
| F4b | 0.29 | 0.71 |

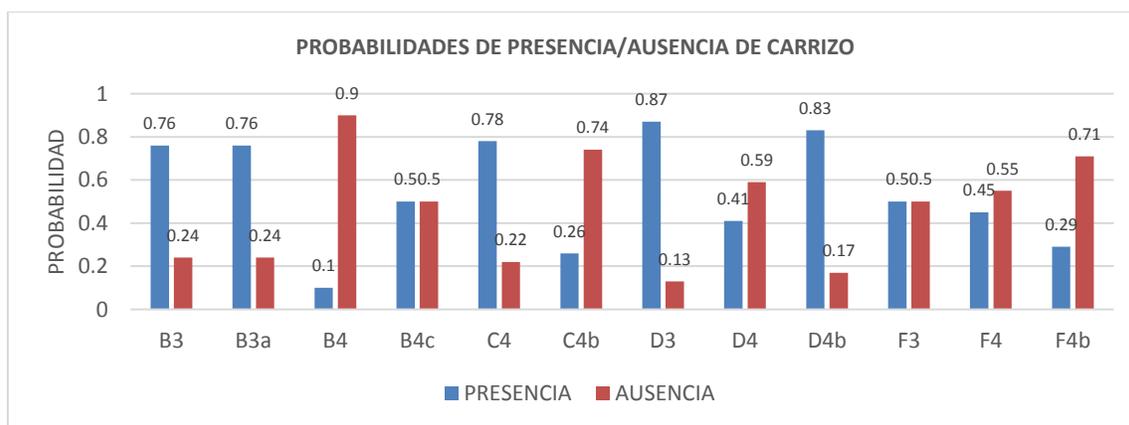


Figura 35. Probabilidades estimadas de presencia/ausencia de carrizo por subtipo fluvial

7.3.4.- Influencia de variables hidrológicas-geomorfológicas en la presencia/ausencia de carrizo

Los resultados de la comparación de cocientes de disparidad (Cuadro 15) muestran que las variables “Pendiente” y “Substrato” tienen efecto significativo sobre la presencia/ausencia de carrizo. El segmento fluvial cuyo substrato fue determinado como S1 (roca madre) no fue incluido en las comparaciones al representar una única observación.

Cuadro 15. Comparación de cocientes de disparidad y límites de confianza para las variables usadas en la Clasificación de Rosgen

| Efecto | RAZÓN DE MOMIOS | Límites de confianza al 95% | |
|---------------------|----------------------------|--|--------------|
| ATR | 1.101 | 0.852 | 1.423 |
| ANPROF | 1.005 | 0.985 | 1.024 |
| SIN | 1.625 | 0.573 | 4.609 |
| PENDT | 1.153 | 1.073 | 1.238 |
| SUB S3 vs S4 | 0.005 | <0.001 | 0.133 |

ATR: relación de atrincheramiento; ANPROF: relación ancho/profundidad; SIN: sinuosidad; PENDT: pendiente de cauce; SUB: substrato; S3: substrato clase cantos; S4: substrato clase grava

8.- DISCUSIÓN

8.1.- Invasión por carrizo en el área de estudio

La distribución del carrizo en las partes alta y media de la subcuenca del río Pílon muestra el patrón longitudinal descrito por numerosos autores como característico de esta especie (Bell, 1997; McGaugh *et al.*, 2006; Coffman, 2007; Flores *et al.*, 2008; CIPC, 2011), encontrándose de forma casi exclusiva a lo largo de las márgenes y llanura aluvial de la corriente principal (órdenes fluviales 5°, 6° y 7°) de la subcuenca. Este hecho refleja el patrón longitudinal de dispersión del carrizo, que como se mencionó anteriormente, está en función principalmente de los eventos episódicos de disturbio fluvial y ocurre con dirección aguas abajo. Es posible que esta distribución esté también asociada al flujo base permanente presente en estos órdenes fluviales.

Resalta el hecho de que la concentración mayor de carrizo a lo largo de la unidad de estudio coincide territorialmente con los principales núcleos poblacionales y huertas nogaleras a lo largo del río Casillas. Esto sugiere la posible existencia de una relación de causalidad entre dichas poblaciones y actividades productivas y la invasión por carrizo en el mismo territorio, tomando en cuenta los hallazgos de Coffman (2007) que demuestran que el exceso en suelo de nutrientes derivado de prácticas de manejo en una cuenca promueve el desarrollo de *A. donax* y su invasión en sistemas riparios. Los núcleos poblacionales pudieran estar representando una fuente puntual de contaminación del río, al no contar con un sistema de drenaje entubado, y al practicar la crianza en traspatio de animales como cerdos, gallinas y cabras; por otro lado, en la producción de nuez se emplean anualmente agroquímicos bajo forma principalmente de fertilizantes para los árboles nogaleros, lo cual tiene el claro riesgo de fungir como una importante fuente de contaminación fluvial con nutrientes.

Las condiciones de abundancia artificial de recursos nutricionales propiciadas por esta contaminación estarían beneficiando el desarrollo del carrizo, que como mencionan varios autores, demuestra una superior capacidad competitiva ante las especies riparias nativas bajo

condiciones de bajo estrés ambiental y abundancia de nutrientes (Alpert *et al.*, 2000; Daehler, 2003; Coffman, 2007).

Una observación de relevancia en el área de estudio respecto a la vegetación riparia nativa concierne a la especie de árboles sabinos *Taxodium* sp. que la integran como una de las especies dominantes del dosel arbóreo (Mata-Balderas, 2004). Si bien se encontraron individuos adultos, resalta la casi nula presencia de individuos juveniles de reemplazo generacional observada a lo largo de la unidad de estudio. Tal situación es similar para el caso de las especies *Populus* spp. y *Platanus* spp., para las que, si bien se observaron individuos juveniles, éstos se encuentran mayoritariamente en hábitats de regeneración no estables (Nakamura y Inahara, 2007), estando los sitios estables ocupados por rodales de carrizo. Se observaron a este respecto numerosas instancias de invasión espacial de individuos juveniles de ambas especies por parte del carrizo.

Estas observaciones aportan evidencia preliminar de que en el área de estudio la invasión por carrizo está afectando a la vegetación riparia mediante desplazamiento directo e indirecto de las especies nativas, dinámica documentada por diversos autores para otras regiones afectadas (Malanson, 1993; Bell, 1997; McGaugh *et al.*, 2006; Flores-Maldonado *et al.*, 2008; CIPC, 2011)

8.2.- Clasificación tipológica fluvial del río Casillas-Pilón

La clasificación de Rosgen aplicada al área de estudio indica la ocurrencia de 14 subtipos fluviales integrando las corrientes río Casillas y río Pilón en las partes alta y media de la subcuenca del río Pilón.

Resaltan como más frecuentes los subtipos fluviales D4 (25 % frecuencia relativa ó f.r.) y C4 (23 % f.r.), correspondiendo D4 a cauces trenzados de pendiente media y taludes inestables, y C4 a cauces con secuencias *pool-riffle* características de valles aluviales de montaña de pendiente moderada (Bisson *et al.*, 2006). Siguen en frecuencia los tipos C4b (14 % f.r.),

diferenciado de C4 por una mayor pendiente, B4 (14 % f.r.), tramos fluviales en valles intermedios de montaña de pendiente moderada-alta y sin llanura aluvial, y F4b (11 % f.r.), cauces atrincherados típicos de cañones y secciones de fondo de valle con moderada pendiente (Jennings y Harman, 1999). Se hallan finalmente con menor frecuencia otras variantes fluviales, pero siempre acotadas a los tipos fluviales generales B, C, D y F (ver Figura 30).

La distribución y diversidad de tipos fluviales refleja las características topográficas y geomorfológicas del área de estudio, presentándose los tipos B y C principalmente en la parte alta de la cuenca desde su cabecera hasta el límite con los valles aluviales en su parte media, seguidos por los tipos D que ocupan dichos valles aluviales, y finalmente los tipos F que se presentan principalmente al final de la parte media de la subcuenca, en la sección encañonada correspondiente al cañón Puerta La Boca.

Dicha distribución corresponde en general con lo expuesto por diversos autores (Endreny, 2003; Bisson *et al.*, 2006; Jennings y Harman, 1999; EPA, 2018) al describir la ocurrencia de manera general en ríos de un patrón longitudinal de variación de tipos de tramos fluviales en dirección aguas abajo, contextualizado bajo el *concepto de continuo fluvial* propuesto por Vannote *et al.* (1980) y trabajado por numerosos geomorfólogos fluviales. Cambios en la litología y/o la estructura de drenaje, así como el arreglo de confluencias y la alternancia en tramos de valle y de cañón determinan eventualmente interrupciones de dicho patrón, con el resultado de crear sitios locales de rasgos geomorfológicos particulares (Brierley y Fryirs, 2005; Allan y Castillo, 2007), lo cual se demuestra en el área de estudio por la interrupción puntual del continuo longitudinal de variación en tipos fluviales.

8.3.- Relación entre los tipos fluviales y el carrizo en el área de estudio

Los análisis realizados permiten afirmar que el subtipo fluvial tiene influencia en la incidencia del carrizo en el área de estudio. En términos de frecuencia, las mayores frecuencias relativas de carrizo en el área de estudio se presentan en los subtipos fluviales C4

(con 40% de frecuencia relativa) y D4 (con 22% de frecuencia relativa) (Figura 32). En términos de probabilidades, son los subtipos D3, D4b y C4 aquellos cuyo efecto sobre el carrizo implica mayor probabilidad de presencia (0.87, 0.83 y 0.78, respectivamente). Por el contrario, los subtipos B4, C4b y F4b son los que mayor efecto contrario ejercen, presentando la mayor probabilidad para la ausencia de carrizo (0.90, 0.74 y 0.71 respectivamente) (Figura 33).

Los subtipos D3 corresponden a cauces trenzados de pendiente media y taludes inestables, con substrato de cantos y llanura aluvial moderadamente desarrollada; D4b son también cauces trenzados pero diferenciados por una mayor pendiente y un substrato de grava; C4 son cauces con secuencias *pool-riffle*, caracterizados por un substrato de grava y una llanura aluvial marcada (Rosgen, 1994; Bisson *et al.*, 2006). En el área de estudio estos subtipos D3, D4b y C4 se ubican a lo largo de la parte intermedia de la unidad de estudio, coincidiendo territorialmente con los principales núcleos poblacionales y huertas nogaleras

Los subtipos B4 corresponden a cauces estables en valles intermedios de montaña de pendiente moderada-alta y sin llanura aluvial; C4b se diferencian de C4 por tener una pendiente mayor; F4b son cauces atrincherados típicos de cañones y secciones de fondo de valle con moderada pendiente (*ibid.*). En el área de estudio estos subtipos B4, C4b y F4b conforman principalmente los tramos fluviales en la cabecera de cuenca y parte inicial-intermedia de la unidad de estudio.

La comparación de cocientes de disparidad aplicada a las variables hidrológicas y geomorfológicas definitorias de los tipos fluviales indica que la pendiente y el substrato tienen efecto significativo sobre la ocurrencia de carrizo. Ambos son factores determinantes de la velocidad y fuerza de la corriente, factores que tienen influencia directamente sobre las especies de plantas riparias (Malanson, 1993; Brierley y Fryirs, 2005; Allan y Castillo, 2007).

Sin embargo, la coincidencia territorial entre los subtipos fluviales que influyen positivamente la presencia de carrizo y los núcleos poblacionales y productivos, hace necesario explorar ulteriormente los factores ambientales en el área de estudio, en este caso

la posible contaminación del cauce con nutrientes, para dilucidar su peso como factores causales en la presencia del carrizo.

Sin esta información, los hallazgos de la presente investigación no son por sí mismos concluyentes para afirmar que las variables hidrológicas-geomorfológicas implícitas en los tipos fluviales presentes en el área de estudio sean los factores causales del desarrollo del carrizo a lo largo del río Casillas – Pílon.

Dadas las características biológicas de *A. donax*, que la vuelven una especie con gran capacidad de adaptación a un amplio rango de condiciones ambientales fluviales, es necesario reconocer la posibilidad de que el carrizo, una vez establecido por introducción directa, no requiera de la presencia para su ulterior desarrollo de ningún factor ambiental en particular, sea éste alguna característica hidrológica o geomorfológica del cauce invadido, u otro. Esta posibilidad es sugerida por diversos investigadores (Malanson, 1993; Bell, 1997; McGaugh *et al.*, 2006; Coffman, 2007; Flores-Maldonado *et al.*, 2008; CIPC, 2011), y señalada en particular por el GISD (2015), que cataloga por dicha razón al carrizo como una de las cien especies exóticas invasoras más peligrosas del mundo.

Una observación importante respalda esta posibilidad: de los 14 tipos fluviales que conforman la unidad de estudio, 12 presentan incidencia de carrizo. Esto se ve reflejado en cómo en el área de estudio el carrizo se observó establecido en ambientes con condiciones hidrológicas y geomorfológicas disímiles.

9.- CONCLUSIONES

El presente trabajo hace dos aportaciones importantes al conocimiento para la conservación de la subcuenca del río Pílon.

Se determinó la extensión actual de la invasión por carrizo *A. donax* en el río Casillas-Pílon en las partes alta y media de la subcuenca, comprobándose que dicha especie exótica invasora se encuentra establecida a lo largo de gran parte de la longitud del cauce, principalmente en los subtipos fluviales C4 y D4. El registro preciso realizado de la extensión del carrizo en el área de estudio permitirá contar con una base de referencia para las acciones de manejo a desarrollarse en un futuro cercano para el control y erradicación de dicha especie.

Se caracterizó la corriente principal mediante la Clasificación de Rosgen. La información generada representa una base fundamental de referencia para el desarrollo de estrategias de evaluación, monitoreo y manejo de los ecosistemas acuáticos, riparios y terrestres de la subcuenca y sus recursos hídricos. Así mismo, se cumple con la necesidad primordial de contar con la información básica que posibilita la comparación entre cuencas para la evaluación de planes de aprovechamiento y/o restauración.

Los hallazgos del presente trabajo aportan al conocimiento sobre el carrizo *A. donax*, explorando la influencia que sobre su establecimiento y desarrollo tienen los factores hidrológicos y geomorfológicos subyacentes a la caracterización tipológica fluvial aplicada al área de estudio. Se encontró que los subtipos fluviales D3, D4b y C4, tramos que desarrollan una llanura aluvial y se encuentran adyacentes a núcleos poblacionales y productivos, tienen efecto positivo sobre la presencia de carrizo.

Dada la gran importancia socioeconómica y ambiental de la subcuenca del río Pílon, los resultados aquí expuestos indican la necesidad urgente por atender la problemática de invasión del río Casillas-Pílon por la especie exótica invasora *A. donax*, con el fin de evitar su ulterior avance y reestablecer las condiciones propicias para el mantenimiento de los servicios ambientales que aporta la subcuenca a las poblaciones e industrias de la región y

que son necesarios para el bienestar y prosperidad de los habitantes del estado de Nuevo León y del resto de México.

10.- LITERATURA CITADA

- Agresti A. 2002. *Categorical Data Analysis*. 2nd edition. Wiley-Interscience. 710 pp.
- Allan J. y M. Castillo. 2007. *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters*. Springer Science. Dordrecht, The Netherlands
- Alpert P., Bone E. y C. Holzapfel. 2000. Invasiveness, invasibility and the role of environmental stress in the spread of non-native plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 3: 52-66
- Antonio-Némiga *et al.* 2006. Cambios en la vegetación en la subcuenca del Río Pilón, Nuevo León, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 12(1): 5-11
- BID (Banco Interamericano del Desarrollo). 2015. Programa Nacional de Reservas de Agua en México. Experiencias de caudal ecológico y la asignación de agua al ambiente. México. 58 pp.
- Bell G. 1997. Ecology and management of *Arundo donax*, and approaches to riparian habitat restoration in southern California. En: Brock J., M. Wade, P. Pysek, D. Green (Eds.) *Plant Invasions: Studies from North America and Europe*. The Netherlands. pp. 103-113
- Bisson P., Montgomery D. y J. Buffington. 2006. Valley segments, stream reaches, and channel units. En: Hauer F. y G. Lamberti (Eds.), *Methods in Stream Ecology*, 2nd ed. Academic Press / Elsevier, EEUU. pp. 23-49
- Brierley G. y K. Fryirs. 2005. *Geomorphology and River Management. Applications of the River Styles Framework*. Blackwell Science Ltd. 412 pp.
- Buffington J. y D. Montgomery. 2013. Geomorphic classification of rivers. *Treatise on Geomorphology*. Elsevier. pp. 730-767
- Capon S., Chambers L., Mac Nally R., Naiman R., Davies P., Marshall N., Pittock J., Reid M., Capon T., Douglas M., Catford J., Baldwin D., Stewardson M., Roberts J., Parsons M. and S. Williams. 2013. Riparian Ecosystems in the 21st Century: Hotspots for Climate Change Adaptation? *Ecosystems* 16: 359-381
- Ceballos G., Ehrlich A. y P. Ehrlich. 2015. *The Annihilation of Nature. Human Extinction of Birds and Mammals*. Johns Hopkins University Press
- CIPC (California Invasive Plant Council). 2011. *Arundo donax* (giant reed): Distribution and Impact Report. California Invasive Plant Council (Cal-IPC). Disponible en: <http://www.cal-ipc.org/solutions/research/arundo-report>
- Claridge K. y S. Franklin. 2002. Compensation and plasticity in an invasive plant species. *Biological Invasions* 4: 339-347

- CCFFNL (Consejo Consultivo Estatal para la Preservación y Fomento de la Flora y Fauna Silvestre de Nuevo León). 1995. Listado preliminar de la fauna silvestre del estado de Nuevo León, México. Impresora Monterrey, S.A. México. 89 pp.
- Coffman G. 2007. Factors Influencing Invasion of Giant Reed (*Arundo donax*) in Riparian Ecosystems of Mediterranean-type Climate Regions. Tesis doctoral. University of California, Los Angeles, EEUU. 282 pp.
- Coffman G., R. Ambrose y P. Rundel. 2010. Wildfire promotes dominance of invasive giant reed (*Arundo donax*) in riparian ecosystems. *Biological Invasions* 12 (8): 2723-2734
- CONABIO. 2000. Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F.
- CONABIO-CONANP. 2010. Sitios prioritarios acuáticos epicontinentales para la conservación de la biodiversidad. Escala 1:1000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México, D. F.
- Daehler C. 2003. Performance comparison of co-occurring native and alien invasive plants: implications for conservation and restoration. *Annual Review of Ecological and Evolutionary Systematics* 34: 183-211
- DeBano L. *et al.* 2003. Management of Natural Resources in Riparian Corridors. *Journal of the Arizona-Nevada Academy of Science*. 35 (1): 58-70
- Endreny, T. 2003. Fluvial Geomorphology Module, UCAR COMET Program and NOAA River Forecast Center. <http://www.fgmorph.com>
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2018. Fundamentals of Rosgen Stream Classification System. Watershed Academy Web. Disponible en línea en la dirección: https://cfpub.epa.gov/watertrain/moduleFrame.cfm?parent_object_id=1189
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2018. Ecosystem Services & Biodiversity. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en: <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/en/>
- Flores-Maldonado J., Prado-Navarro A., Domínguez-Orozco A., Mendoza R. y A. González-Martínez. 2008. El carrizo gigante, especie invasora de ecosistemas riparios. CONABIO. *Biodiversitas* 81: 6-10
- Flores A. y M. Wood. 2009. Biocontrol battle begins against giant reed (*Arundo*). *Agricultural Research*. 57 (6): 12-13
- Forslund A. *et al.* 2009. Securing water for ecosystems and human well-being: the importance of environmental flows. Swedish Water House Report 24. SIWI, 2009.

- GISD (Global Invasive Species Database). 2015. Species Profile *Arundo donax*. Disponible en: <http://www.iucngisd.org/gisd/species.php?sc=112>
- Grime J. 1977. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *American Naturalist* 111: 1169-1194
- Hendrickson D. y S. McGaugh. 2005. *Arundo donax* (Carrizo Grande /Giant Cane) in Cuatro Ciénegas. <http://desertfishes.org/cuatroc/organisms/non-native/arundo/Arundo.html>
- Herrera A. y T. Dudley. 2003. Reduction of riparian arthropod abundance and diversity as a consequence of giant reed (*Arundo donax*) invasion. *Biological Invasions* 5 (3): 167-177
- IAENL. 2011. Diagnóstico sobre la Gestión y el Uso del Agua en el Sector Agropecuario de Nuevo León. Instituto del Agua del Estado de Nuevo León. Apodaca, N.L. 287 pp.
- IMTA, 2017. Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Mor. México. Disponible en: <https://www.imta.gob.mx/productos/software/eric-iii-version-3-2-extractor-rapido-de-informacion-climatolo-detail>
- IMTA, 2017. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Publicado en 1999. Disponibles en: <https://www.imta.gob.mx/bandas>
- INEGI. 2018. Acervo de información geográfica. Instituto de Estadística y Geografía. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geografia/default.aspx>
- INEGI. 2018. Relieve continental. Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR. Disponible en: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/relieve/continental/>
- ITESM. 2009. Diagnóstico Integrado de la Cuenca del Río San Juan. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, México
- Jennings G. y W. Harman. 1999. Application of the Rosgen Stream Classification to North Carolina. River Course. Disponible en: <https://content.ces.ncsu.edu/application-of-the-rosgen-stream-classification-to-north-carolina>
- Kisner D. 2004. The effect of giant reed (*Arundo donax*) on the southern California riparian bird community. Tesis de maestría. San Diego State University. San Diego, California.
- Knighton D. 1984. Fluvial Forms and Processes. Editorial Arnold, Londres, Reino Unido. 218 pp.
- Knighton D. 1998. Fluvial Forms and Processes: A New Perspective. Editorial Arnold, Londres, Reino Unido. 383 pp.

- Koleff P. 2017. Conceptos básicos sobre las invasiones biológicas y sus impactos a la biodiversidad. En: *Principales retos que enfrenta México ante las especies exóticas invasoras*. Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública. México, D.F. 255 pp.
- Kominoski J. *et al.* 2013. Forecasting functional implications of global changes in riparian plant communities. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11 (8): 423-432
- Lambert A., Dudley T. y K. Saltonstall. 2010. Ecology and Impacts of the Large-Statured Invasive Grasses *Arundo donax* and *Phragmites australis* in North America. *Invasive Plant Science and Management* 3: 489-494.
- López-López A. y M. Pando-Moreno (coordinadores). 2014. Región Citrícola de Nuevo León. Su complejidad territorial en el marco global. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 382 pp.
- Lowe S., Browne M., Boudjelas S., De Poorter M. 2000. 100 of the World's Worst Invasive Alien Species. A selection from the Global Invasive Species Database. The Invasive Species Specialist Group (ISSG), World Conservation Union (IUCN). 12 pp.
- Malanson, G.P. 1993. *Riparian Landscapes*, Cambridge Studies in Ecology, Cambridge University Press, Cambridge, 296 pp.
- Mariani C. *et al.* 2010. Origin, diffusion and reproduction of the giant reed (*Arundo donax* L.): a promising weedy energy crop. *Annals of Applied Biology* 157: 191-202
- Mata-Balderas J. 2004. Caracterización de la cubierta vegetal en la cuenca del río Casillas, municipio Rayones, Nuevo León. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. 75 pp.
- Martínez-Zepeda L. 2012. Determinación de caudales ambientales para ríos de la Cuenca del Río San Juan (México) mediante la aplicación de métodos hidrológicos. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Civil. 231 pp.
- Matthews N. 2016. People and fresh water ecosystems: pressures, responses and resilience. *Aquatic Procedia* 6: 99-105
- Maurer D. y J. Zedler. 2002. Differential invasion of a wetland grass explained by tests of nutrients and light availability on establishment and clonal growth. *Oecologia* 131: 279-288
- McGaugh S., Hendrickson D., Bell G., Cabral H., Lyons K., McEachron L. y O. Muñoz. 2006. Fighting an aggressive wetlands invader: a case study of giant reed (*Arundo donax*) an its threat to Cuatro Ciénegas, Coahuila, México. En: Lozano-Vilano L., Contreras-Balderas A. (Eds.), *Studies of North American Desert Fishes in Honor of E.P. (Phil) Pister*, Conservationist, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas, Monterrey, México, pp. 100-115

- Nakamura F. y S. Inahara. 2007. Fluvial geomorphic disturbances and life history traits of riparian tree species. En: *Plant Disturbance Ecology: The Process and the Response*. Academic Press – Elsevier, pp. 283-310
- Navar J. y E. Rodríguez. 2002. Caracterización de las superficies agrícolas y sus volúmenes de irrigación en la cuenca del río San Juan, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 47: 77-91
- Newson M., Clark M., Sear D., Brookes A. 1998. The geomorphological basis for classifying rivers. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. 8: 415-430
- Poff N., Allan J., Bain M., Karr J., Prestegard K., Richter B., Sparks R. y J. Stromberg. 1997. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*. Vol. 47 (11): 769-784
- Quinonez O. 2007. Aplicación del Sistema de clasificación fluvial de Rosgen en arroyos urbanos de la región oeste del estado de Paraná (Brasil). *Tercer Simposio sobre Hidráulica de Ríos, 2007, Córdoba (Argentina)*. *Hidráulica de ríos: fundamentos, procesos e ingeniería*. Editorial Científica Universitaria.
- Ricciardi A. y J. Rasmussen. 1999. Extinction rates of North American freshwater fauna. *Conservation Biology* 13: 220-222
- Richter B., Baumgartner J., Wigington R. y D. Braun. 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology*. 37 (1): 231-249
- Rosgen, D. 1994. A classification of natural rivers. *Catena* (22): 169-199
- Sánchez R. 1987. Algunas características hidrológicas del río Pilón, N.L. *Ingeniería Hidráulica en México*. Mayo-Agosto 1987. México.
- Sarukhán J., P. Koleff, J. Carabias, J. Soberón, R. Dirzo, J. Llorente-Bousquets, G. Halffter, R. González, I. March, A. Mohar, S. Anta y J. de la Maza. 2009. Capital Natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad. México, D.F. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano). 2008. Carta Geológico-Minera Monterrey G14-7 Nuevo León y Coahuila. Servicio Geológico Mexicano. Pachuca, México.
- SEMARNAT. 2014. Ríos libres y vivos, introducción al caudal ecológico y reservas de agua. México. 48 pp.
- Tilman D. 1988. *Plant Strategies and the Dynamics and Structure of Plant Communities*. Princeton University Press, Princeton, EEUU.
- Tockner K. y J. Stanford. 2002. Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation* 29 (3): 308-330

- UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Millenium Ecosystem Assessment*. United Nations Environment Programme.
- Vannote R., Minshall G., Cummins K., Sedell J. y C. Cushing. 1980. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37: 130-137
- Vidales-Contreras J., Pissani-Zuñiga J., Rodríguez-Fuentes H., Olivares-Sáenz E., Aranda-Ruiz J. y A. Luna-Maldonado. 2014. Regimens of ecological flow rates on the Pílon river. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*. 2 (4): 380-386
- Wentworth C. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology* Vol. 30 (5): 377-392
- Wheaton J., Fryirs K., Brierley G., Bangen S., Bouwes N. y G. O'Brien. 2015. Geomorphic mapping and taxonomy of fluvial landforms. *Geomorphology* 248: 273-295
- Wolman M. 1954. A method of sampling coarse riverbed material. *Transactions of the American Geophysical Union* 35: 951-956
- Yi Y. y X. Wang. 2011. Comparison of Wald, Score and Likelihood Ratio Tests for Response Adaptive Designs. *Journal of Statistical Theory and Applications* Vol. (10) 4: 553-569