



UNIVERSIDAD DE SONORA

**DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y
TECNOLÓGICAS**

POSGRADO EN BIOCENCIAS

**ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA, COMPOSICIÓN
Y FUNCIÓN DE LA VEGETACIÓN RIBEREÑA DE
ZONAS ÁRIDAS, Y SU RELACIÓN CON LOS
PRINCIPALES USOS DE SUELO EN SONORA:
EL CASO DEL RÍO SAN MIGUEL.**

TESIS

que para obtener el grado de:

MAESTRO EN BIOCENCIAS

presenta:

LARA ALEJANDRINA CORNEJO DENMAN

Hermosillo, Sonora, México

Agosto de 2017

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

DERECHOS DE AUTOR

El presente trabajo de tesis se presenta como uno de los requisitos parciales para la obtención del grado de **Maestra en Biociencias** de la Universidad de Sonora.

Se deposita en la biblioteca de Ciencias Biológicas y de la Salud para ponerla a disposición de los interesados. Se permiten citas breves del material contenido en la tesis sin permiso del autor, siempre y cuando se otorgue el crédito correspondiente. Para reproducir, o en su caso referirse a este documento en forma parcial o total, se deberá solicitar la autorización al Coordinador del Programa del Posgrado.

Bajo cualquier otra circunstancia se debe solicitar permiso directamente al autor.

Atentamente

Lara Alejandrina Cornejo Denman

Autor

Dra. Nohemí Gámez Meza

Coordinadora del Programa de Maestría en Biociencias

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA, COMPOSICIÓN Y FUNCIÓN DE LA VEGETACIÓN
RIBEREÑA DE ZONAS ÁRIDAS, Y SU RELACIÓN CON LOS PRINCIPALES USOS DE
SUELO EN SONORA: EL CASO DEL RÍO SAN MIGUEL

T E S I S

que para obtener el grado de:

MAESTRA EN BIOCIENCIAS

presenta:

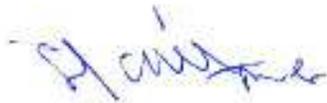
LARA ALEJANDRINA CORNEJO DENMAN

Hermosillo, Sonora, México

11 de agosto de 2017

APROBACIÓN

Los miembros del Comité designado para revisar la tesis titulada "Análisis de la estructura, composición y función de la vegetación ribereña de zonas áridas y su relación con los principales usos de suelo en México: el caso del río San Miguel" presentada por la Lic. Biol. Lara Alejandrina Cornejo Denman, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestra en Biociencias con Especialidad en Ecología y Sustentabilidad de Zonas Áridas.



Dr. José Raúl Romo León
Director y Presidente



Dr. Alejandro Emilio Castellanos Villegas
Sinodal interno y Secretario



José Luis Moreno Vázquez
Sinodal externo



Dr. Rolando Enrique Díaz Caravantes
Sinodal externo

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por financiar mis estudios de maestría.

A la Universidad de Sonora, a la División de Ciencias Biológicas y de la Salud, al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas y al Posgrado en Biociencias por permitirme continuar con mis estudios de educación superior, así como a los profesores de la maestría.

Al Dr. José Raúl Romo León por la confianza, el apoyo y la disposición para realizar el proyecto de tesis y por el invaluable aprendizaje obtenido durante estos dos años.

A los sinodales de esta tesis, Dr. Alejandro Emilio Castellanos Villegas, Dr. José Luis Moreno Vázquez, Dr. Rolando Enrique Díaz Caravantes, por su ayuda, valiosos comentarios y contribuciones al trabajo realizado.

A todos los compañeros del Laboratorio de Ecosistemas y Percepción Remota (Romeo, Karen y Faby) y del Laboratorio de Ecofisiología Vegetal (José, César, Emilio, Caro, Chimo, Marco Polo, Lupita, Tere, Diana, Nacho), por que de todos he aprendido cosas nuevas y sin su apoyo hubiera sido imposible concretar este trabajo, y por que además de ser compañeros de la universidad se han convertido en verdaderos amigos.

A las personas del campo, que nos permitieron atravesar potreros y brincar cercos, que nos ofrecieron un café y tortillas de harina, y que nos compartieron su conocimiento sobre el mundo natural.

A mis compañeros de generación del posgrado, Edna, Daniela, Felipe y Cire, fuimos una generación pequeña, pero nos divertimos mucho.

A mi familia y amigos por animarme y apoyarme. Sobre todo, a mi mamá Catalina por su amor, inspiración y fortaleza, y a mi papá Gerardo, por transmitirme el amor a la naturaleza y al conocimiento, y por que aún ausente, sigue siendo mi mayor maestro. A mi novio Héctor por su amor y apoyo incondicional, y por la emoción de los proyectos futuros.

RESUMEN

Los ecosistemas ribereños en zonas áridas (ERZA) son proveedores de recursos, y suministran servicios de soporte tales como productividad, flujo de energía, descomposición y deposición de material orgánico y diversidad de vida silvestre. Las actividades humanas asociadas al cambio de uso de suelo constituyen un factor fundamental en la modificación de estos ecosistemas, los cuales son altamente susceptibles a los disturbios naturales y humanos. Dichas modificaciones se pueden ver reflejadas en cambios en la vegetación, así como en el intercambio de servicios ecosistémicos. El presente trabajo describe aspectos de la vegetación en 8 sitios perturbados de la cuenca del río San Miguel, bajo la premisa de que la modificación por distintos usos del suelo tendrá un efecto sobre: 1) la estructura y 2) el funcionamiento de la vegetación de los ecosistemas ribereños de zonas áridas (ERZA). Se registraron diversos parámetros de la vegetación mediante 3 diferentes metodologías (muestreo en campo, imágenes aéreas e imágenes satelitales). Se desarrolló y aplicó un índice de perturbación (IPb), con el fin de clasificar los 8 sitios seleccionados. Los sitios con mayor IPb se encuentran al sur de la cuenca y tienen influencia de agricultura comercial y actividad recreativa. Existen diferencias en composición entre los sitios con mayor y menor IPb, encontrando que en aquellos con mayor IPb dominan especies ribereñas-facultativas y no-riberañas. En la mayoría de los sitios la vegetación ribereña presentó mayor productividad que el matorral desértico y que el mezquital ribereño, durante las temporadas de pre y post monzón (mayo y septiembre). La productividad mostró una relación inversa con el IPb. El uso de Plataformas Aéreas No Tripuladas permite el análisis detallado de la vegetación y constituye una herramienta potencial para posteriores estudios a escala regional.

ABSTRACT

Arid riparian ecosystems provide resources and support services such as productivity, energy flow, organic matter decomposition and deposition, and diversity. Land use associated to human activities constitutes a major modification factor in arid riparian ecosystem's, which are highly susceptible to natural and human disturbance. Such modifications can generate changes in vegetation and influence ecosystem service tradeoff. The present study describes several aspects of the vegetation in 8 disturbed sites along the San Miguel river, based on the understanding of how land use change will have an effect on: 1) structure and 2) function of vegetation in arid riparian ecosystems. In order to classify the selected study sites, an Anthropogenic Disturb Index was developed and applied. Sites with the highest disturbance are located in the southern part of the sub watershed and are characterized by the presence of commercial agriculture and recreational activities. There are differences in the vegetation composition among sites with different disturbance degree, those with the highest disturbance are dominated by riparian-facultative and none-riparian species. In most of the sites, riparian vegetation had a higher photosynthetic activity than riparian mesquite woodland, during pre and post monsoon seasons. Photosynthetic activity showed an inverse relation with disturbance. Unmanned aerial vehicles allow a detailed analysis of vegetation and have great potential for further studies at regional scale.

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
I. ANTECEDENTES.....	5
I.1. Características biológicas y ecológicas de los Ecosistemas Ribereños en Zonas Áridas (ERZA) de Norteamérica.....	6
I.2. Disturbio y perturbación en ERZA.....	9
I.2.1. Casos de estudio - Alteraciones de los ecosistemas ribereños.....	11
I.3. Actividades productivas y sus impactos en los ríos de Sonora	13
I.3.1. Agricultura	14
I.3.2. Ganadería	16
I.3.3. Minería.....	17
I.4. Río San Miguel – Antecedentes ecológicos y sociales	18
I.5. Percepción remota para el análisis de la vegetación.....	22
I.5.1. Casos de estudio – Metodologías en percepción remota	23
II. HIPÓTESIS	26
III. OBJETIVOS.....	27
III.1. Objetivo general.....	27
III.2. Objetivos específicos	27
IV. MÉTODOS.....	28
IV.1. Área de estudio	28
IV.2. Selección de sitios de estudio y determinación del grado de perturbación	30
IV.3. Caracterización de la estructura, composición y cobertura de la vegetación en campo	33

IV.4. Descripción de los índices de diversidad.....	36
IV.5. Captura de imágenes aéreas de alta resolución espacial y derivación de ortomosaicos	38
IV.6. Obtención de imágenes satelitales de resolución espacial moderada.....	40
IV.6.1. Derivación de índices de la vegetación.....	41
IV.7. Combinación de imágenes de alta y mediana resolución	42
IV.8. Análisis de variables y actividad fotosintética en vegetación de río y adyacente	44
IV.8.1. Coberturas	44
IV.8.2. Actividad fotosintética estacional	45
IV.8.3. Actividad fotosintética en sitios con vegetación ribereña y mezquital ribereño....	46
IV.8.4. Actividad fotosintética y perturbación	46
V. RESULTADOS	48
V.1. Índice de perturbación.....	48
V.2. Muestreo de la vegetación en campo – Estructura, cobertura, composición y diversidad	52
V.3. Coberturas derivadas de imágenes aéreas.....	57
V.4. Cobertura de la vegetación y perturbación	59
V.5. Índices de vegetación derivados de imágenes satelitales.....	62
V.5.1. Mosaicos de río	63
V.5.2. Mosaicos de matorral desértico.....	64
V.6. Análisis comparativos de actividad fotosintética.....	65
V.7. Actividad fotosintética en sitios con vegetación ribereña y mezquital ribereño.....	76
V.8. Relación fotosíntesis-perturbación.....	81
VI. DISCUSIÓN.....	83
VI.1 Perturbación en sitios ribereños.....	83
VI.2 Composición, estructura y función de la vegetación ribereña y vegetación adyacente.	84
VII. CONCLUSIONES	89
VIII. RECOMENDACIONES	90
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
X. APÉNDICES	104
XI. ANEXO FOTOGRÁFICO.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
1	Localización del área de estudio	29
2	Esquema del transecto y cuadrantes de muestreo	36
3	Imagen de Google Earth que muestra la ruta seguida por la PANT, los puntos rojos indican las imágenes capturadas	39
4	A la izquierda: ortomosaico que muestra una sección de río en el sitio La Galera. A la derecha: sobre-posición del ortomosaico sobre la escena Landsat. Los cuadros son los pixeles de Landsat	43
5	El cuadro representa un pixel y los círculos verdes son árboles y vegetación. La flecha es el mouse y el perímetro de líneas negras representa la digitalización del área. Las medidas se realizaron en orden de las manecillas del reloj comenzando por la esquina inferior izquierda	44
6	Localización de los sitios de estudio y grado de perturbación	50
7	Coberturas por estrato para la vegetación ribereña en cada sitio	53
8	Coberturas por estrato para el matorral desértico en cada sitio	55
9	Cobertura de los tipos de vegetación en cada sitio, ortomosaicos río	58
10	Cobertura de los tipos de vegetación en cada sitio, ortomosaicos matorral	59
11	Regresión lineal entre porcentaje de cobertura de vegetación ribereña (Cob % VR) e índice de perturbación (IPb) ($\alpha=0.050$, $r^2=0.620$)	60
12	Regresión lineal entre porcentaje de cobertura de mezquital ribereño (Cob % MR) e índice de perturbación (IPb) ($\alpha=0.050$, $r^2=0.817$)	61
13	Compuesto de EVI para ambas escenas tomadas para septiembre de 2016. Gradiente de actividad fotosintética representado por el índice mejorado de la vegetación. Los sitios en rojo (con valores más cercanos a 1) son los de mayor actividad fotosintética, mientras los sitios en verde (con valores más cercanos a cero) son los de menor actividad	62
14	Rancho Aguilar (H= 28.23, P= <0.001), N= VR(16) MR(24) MD(11) HE(13)	68
15	La Ciénega (H= 29.19, P= <0.001), N= VR(33) MR(20) MD(9) HE(19)	69

FIGURA		PÁGINA
16	Cercos Vivos (H= 15.92 P= 0.001) N= VR(11) MR(15) MD(19) HE(22)	70
17	El Cajón (H= 14.76 P= <0.001) N= MR(44) MD(5) HE(14)	71
18	Nogalera (H= 11.52 P= 0.003) N= MR(30) MD(12) HE(26)	72
19	La Galera (H= 15.86 P= 0-591) N= VR(18) MR(29) MD(3) HE(38)	73
20	Rancho San Juan (H= 5.45 P= 0-065) N= VR(17) MR(8) HE(20)	74
21	Rancho Tomás (H= 33 P= <0.001) N= VR(17) MR(15) MD(5) MD- Buffel(11) HE(17)	75
22	Rancho San Juan (U= 0, P= <0.001) N= VR(13) MR(7)	77
23	Rancho Tomás (U= 59, P= <0.001) N= VR(27) MR(13)	78
24	Rancho San Juan (U= 1, P= 0.183) N= VR(13) MR(7)	79
25	Cercos vivos (U= 7, P= 0.010) N= VR(11) MR(6)	80
26	Regresión lineal entre valores de EVI (septiembre) para vegetación riberaña e índice de perturbación ($\alpha=0.050$, $r^2=0.142$)	81

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA		PÁGINA
1	Diferenciación de ecosistemas ribereños mexicanos según la región en donde se desarrollan	7
2	Consecuencias de la perturbación por actividades humanas en Ecosistemas Ribereños en Zonas Áridas	10
3	Descripción socio-económica de los municipios de la sub-cuenca del río San Miguel	29
4	Valores para cada criterio	32
5	Interpretación de los valores	33
6	Variables calculadas a partir de los datos obtenidos en el muestreo en campo	36
7	Ubicación espacio/temporal de cada vuelo realizado con la PANT. La R después del nombre del sitio indica los vuelos realizados sobre vegetación ribereña, la M indica matorral desértico. SMH es la abreviación del municipio San Miguel de Horcasitas	39
8	Asignación de bandas en Landsat 8 OLI/TIRS	40
9	Características de las escenas de Landsat 8	41
10	Aplicación de criterios por sitio y grado de perturbación resultante. Sitios: RA (Rancho Aguilar), C (Ciénega), CV (Cercos Vivos), EC (El Cajón), N (Nogalera), LG (La Galera), RS (Rancho San Juan), RT (Rancho Tomás). Grado de perturbación: B-M (Bajo-Medio), I (Intermedio), M-A (Medio-Alto)	51
11	Especies dominantes del estrato arbustivo (Arbu) y arbóreo (Arbo) en vegetación ribereña	54
12	Especies dominantes del estrato arbustivo (Arbu) y arbóreo (Arbo) en matorral desértico	56
13	Índices de diversidad, dominancia y equitatividad para estrato arbustivo y arbóreo	57
14	Porcentaje de cobertura por tipo de vegetación para cada sitio, ortomosaicos río. La superficie total representa el área digitalizada	58
15	Porcentaje de cobertura por tipo de vegetación para cada sitio, ortomosaicos matorral. La superficie total representa el área digitalizada	59

TABLA		PÁGINA
16	Promedio de EVI calculado a partir de los pixeles con más de 50% de cobertura para cada tipo de vegetación, ortomosaicos de río	63
17	Promedio de EVI calculado a partir de los pixeles con más de 50% de cobertura para cada tipo de vegetación, ortomosaicos de matorral	64

INTRODUCCIÓN

Sonora se caracteriza por presentar algún grado de aridez en la mayor parte de su territorio y comúnmente se menciona que el estado es en su mayoría desértico. Sin embargo, debido a su amplia variabilidad ambiental, derivada de su posición geográfica y su extensión territorial, el estado presenta una gran diversidad de ecosistemas cuyos bienes y servicios son difíciles de calcular (Martínez-Yrizar *et al.*, 2010). Esta diversidad alberga distintos tipos de vegetación como matorrales, bosques, vegetación costera, pastizales y desiertos. Las características y funciones de estos ecosistemas se han estudiado en previos trabajos y desde diferentes enfoques, pasando por la caracterización de la biodiversidad (Hernández, H., 2006; Molina-Freaner *et al.*, 2010; Van Devender *et al.*, 2010) hasta la evaluación del impacto de las actividades humanas (Martínez-Yrizar *et al.*, 2010; Castellanos *et al.*, 2010; Zárate, 2012).

Aun cuando la investigación referente a ecosistemas áridos va en aumento, es evidente la gran falta de estudios relacionados con los ecosistemas asociados a corrientes de agua superficial y subterránea (ecosistemas ribereños) en Sonora. Lo anterior resulta alarmante ya que los ecosistemas ribereños en el estado son de vital importancia social y económica, así como de gran relevancia ecológica, pues facilitan las asociaciones vegetales y constituyen espacios en donde ocurre una gran diversidad biológica ya que sirven como nicho para muchas especies de plantas, animales y microorganismos (Granados-Sánchez, 2006).

La importancia de los ecosistemas ribereños en zonas áridas (ERZA) es propia de su condición como proveedores de recursos (ej. agua, nutrientes, suelo), y facilitadores de servicios frecuentemente escasos en regiones que se caracterizan por su baja precipitación y condiciones climáticas extremas. La disponibilidad de agua en ERZA promueve una gran biodiversidad y productividad, en comparación con los ecosistemas terrestres adyacentes (Zaines, 2007). Como consecuencia de lo anterior, se estipula que los ERZA son fuente de múltiples servicios ecosistémicos: culturales, de regulación, de provisión y de soporte tales como productividad primaria, flujo de energía y nutrientes, descomposición y deposición de material orgánico, diversidad de vida silvestre, captura de carbono (Daily *et al.*, 1997; Ewel *et*

al., 2001; Johansen y Phinn, 2006; Brauman *et al.*, 2007; Villarreal *et al.*, 2012; Méndez *et al.*, en prep.).

Los ecosistemas ribereños se ven fuertemente afectados por los factores ambientales del entorno en el que ocurren. Las actividades humanas constituyen un factor fundamental en la modificación de estos ecosistemas, los cuales son altamente susceptibles a los disturbios naturales y humanos. Los ecosistemas ribereños en las zonas áridas son generalmente sistemas muy dinámicos, que se ven modificados por cambios en el uso del suelo (por la introducción de actividades productivas) y cambios climáticos antropogénicos o naturales (Allan, 2004; Villarreal, 2012).

Las principales actividades humanas que alteran los ecosistemas ribereños en zonas áridas incluyen, el desvío del agua de su cauce para almacenamiento, la construcción de presas, el pastoreo de bovinos, la agricultura, la urbanización, la construcción de caminos y la introducción de especies exóticas (Goodrich, D.C. *et al.*, 2000; Kepner *et al.*, 2000; Zaines, 2007; White y Stromberg, 2011; Ely *et al.*, 2013); la sobreexplotación de los acuíferos y la descarga de contaminantes derivados de distintas actividades humanas también constituyen factores de cambio en éstos ecosistemas (CONAGUA, 2013; Carabias, 2014; Chacón, 2014).

Los ecosistemas áridos en el noroeste de México han estado sujetos a diversos tipos de presión debido a la poca planeación en el manejo de recursos (Valencia *et al.*, 2004). Algunos ejemplos de lo anterior son: la desmedida extracción de agua subterránea, lo cual ha provocado problemas de intrusión salina en los acuíferos (Moreno, 2010) y el abandono de extensos campos agrícolas, lo cual propicia procesos de desertificación y degradación (Romo *et al.*, 2014), la extensiva modificación de la cobertura vegetal nativa en diversos ecosistemas, como consecuencia de la ganadería bovina extensiva (Zárate, 2012) y de la introducción de especies exóticas como el zacate buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) para pastoreo (Arriaga *et al.*, 2004; Brenner, 2010; Castellanos *et al.*, 2013). Las actividades anteriores también han tenido efectos y modificaciones en los ecosistemas ribereños; sin embargo, estas dinámicas han sido poco estudiadas.

Los cambios en la vegetación nativa de los ecosistemas ribereños son indicadores clave para entender el impacto de los factores humanos y ambientales sobre su funcionamiento.

Aunque no hay un cálculo específico de la pérdida de vegetación ribereña en Sonora, es evidente que en muchos lugares ésta ha desaparecido y/o ha sido reemplazada por otras especies leñosas mejor adaptadas a la sequía, como mezquites, palo verde o acacias (Scott *et al.*, 2009; Kepner *et al.*, 2000). En la cuenca del Río San Miguel (subcuenca del Río Sonora) se ha determinado que la agricultura y la ganadería son las actividades que han tenido mayor impacto en las dinámicas de cobertura de suelo (Gandarilla-Aizpuro, 2015; Méndez *et al.*, 2016).

Los cambios de uso de suelo provocan modificaciones en la cobertura vegetal, estas modificaciones pueden tener consecuencias en el funcionamiento del ecosistema causando variaciones en la productividad, degradación del suelo, modificaciones en el hábitat de especies vegetales y animales y disminución de diversidad local (Franklin y Molina-Freaner, 2010; Álvarez-Yépiz *et al.*, 2008; López, 2001). Lo anterior puede tener un impacto sobre la provisión de servicios ecosistémicos, ya que la pérdida de cobertura vegetal puede disminuir la productividad del ecosistema, así como reducir la infiltración de agua y aumentar la erosión, provocando una alteración en la recarga de agua subterránea y a su vez alterando ciclo hidrológico y el flujo de energía (EEM, 2005; Balvanera y Cotler, 2009).

El estudio de las modificaciones en el uso del suelo nos ayuda a determinar cuáles son los procesos afectados y los servicios ecosistémicos que se están perdiendo. Los cambios en el uso del suelo pueden tener consecuencias diversas sobre los ecosistemas, afectándolos de manera directa o indirecta (Sánchez *et al.*, 2009). Por ejemplo, una sección de vegetación nativa que es removida para establecer una zona agrícola, un asentamiento humano o un camino, se ve modificada en muchos de sus procesos debido a un drástico cambio en el uso del suelo. Lo anterior, aunado a la introducción de ganado, la explotación excesiva de fuentes de agua, entre otras consecuencias derivadas de las actividades humanas, produce cambios en las dinámicas de uso de suelo, lo cual a su vez tiene impactos en la vegetación (modificaciones en estructura, composición y productividad).

La detección y monitoreo de tales cambios pueden llevarse a cabo a nivel de paisaje mediante el análisis espacial auxiliado por tecnologías de percepción remota y técnicas de sistemas de información geográfica (SIG). Para la mejor comprensión de las dinámicas de cambio en ERZA resulta útil integrar varios niveles de análisis, esto se puede lograr mediante

la combinación de estudios de la vegetación en campo y el análisis de imágenes con diferentes resoluciones espaciales y espectrales provenientes de diversos sensores y plataformas.

El uso de tecnologías de percepción remota nos permite medir cambios en la vegetación y de esta manera determinar tendencias de función (ej. actividad fotosintética), o estado (ej. diversidad o cobertura) en los sistemas estudiados. Dichas tecnologías proveen las bases para generar indicadores de composición en la cobertura del suelo (Kepner *et al.*, 2000). El uso de imágenes aéreas de alta resolución espacial ha servido para realizar análisis de cobertura del suelo (Anderson y Gaston, 2013; Romo *et al.*, 2013; Vivoni *et al.*, 2014); sin embargo, para ecosistemas ribereños de zonas áridas, la información al respecto es escasa o nula.

Con el fin de comprender cómo las actividades humanas afectan diversos parámetros de la vegetación, el presente trabajo busca: 1) explicar la influencia de los diversos usos de suelo sobre las comunidades de vegetación ribereña, y 2) analizar las diferencias en composición, estructura y función de la vegetación ribereña, con respecto a la vegetación desértica adyacente al río. Para lo anterior, se utilizaron técnicas de percepción remota y trabajo de campo para determinar diversas características de la vegetación en varios segmentos de ecosistema ribereño de zonas áridas del estado de Sonora (específicamente del río San Miguel, sub-cuenca del río Sonora), por medio del muestreo de la vegetación en campo, así como del análisis de imágenes aéreas de alta resolución y satelitales de mediana resolución. Finalmente se busca, 3) discutir la variación de las características de la vegetación registradas en cada sitio, en función de los usos de suelo y las dinámicas de paisaje en los segmentos estudiados. Lo anterior con el objeto de contribuir al conocimiento de las dinámicas de ecosistemas ribereños en zonas áridas, como procesos derivados de las actividades humanas presentes en la zona.

I. ANTECEDENTES

Las zonas áridas en México cubren aproximadamente el 65% de su territorio (SEMARNAT, 2015) y se estima que el 30% de la población total del país habita en regiones áridas (SEMARNAT, 2012). Constituidas por diversos tipos de vegetación y un alto número de endemismos, estas zonas albergan una parte importante de la biodiversidad mexicana (Neyra y Durand, 1998).

Sonora es el segundo estado más grande del país con 184,934 km². A pesar de la riqueza en recursos naturales y servicios que los ecosistemas sonorenses proveen, el aprovechamiento de éstos no se ha caracterizado por ser sustentable. Las zonas áridas en Sonora están siendo fuertemente alteradas por múltiples actividades productivas, las cuales inciden principalmente sobre el uso del suelo y del agua (Búrquez y Martínez-Yrizar, 1997; Saucedo, 1997; Atondo *et al.*, 2012; Castellanos *et al.*, 2013); una parte importante de las transformaciones en los ecosistemas del estado son consecuencia de la problemática generada por la introducción de especies exóticas, como el zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*), lo anterior ha provocado pérdida de riqueza de especies (Franklin *et al.*, 2006; Franklin y Molina-Freaner, 2010), cambios en los ciclos biogeoquímicos (Castellanos *et al.*, 2013), así como cambios en la estructura de la vegetación y en las condiciones del suelo (Castellanos *et al.*, 2010).

Aunque se han documentado los impactos de las actividades humanas para diversos ecosistemas sonorenses, como aquellos que se encuentran en las planicies centrales o los bosques templados (Bravo *et al.*, 1992; Búrquez y Martínez-Yrizar, 1997; Castellanos *et al.*, 2002; Ezcurra *et al.*, 2002; Álvarez-Yépiz *et al.*, 2008; Castellanos *et al.*, 2013), existe poca información al respecto de las alteraciones que dichas actividades han causado en los ecosistemas ribereños. Estos ecosistemas son de importancia particular ya que conforman parte intrínseca de las cuencas y de ellos depende la conservación de los recursos hídricos que mantienen procesos ecológicos y actividades humanas (Carabias y Landa, 2005); además son considerados zonas críticas de transición estrechamente conectadas con los ecosistemas aledaños y dependientes de una compleja interacción con el paisaje, lo cual las hace particularmente susceptibles al deterioro (Ewel, 2001) y sensibles a los cambios de uso de suelo a su alrededor.

I.1. Características biológicas y ecológicas de los Ecosistemas Ribereños en Zonas Áridas (ERZA) de Norteamérica

De manera general, los ecosistemas ribereños se pueden definir como aquellos que representan una transición ecológica de comunidades vegetales bien definidas, entre ecosistemas terrestres y arroyos u otros cuerpos de agua (DeBano y Schmidt, 2004). En regiones en donde la precipitación es errática, las sequías prolongadas y las temperaturas extremadamente altas, los ecosistemas ribereños destacan por tener una diversidad considerablemente distinta y una mayor productividad que los ecosistemas desérticos adyacentes, debido a la presencia casi constante de agua y las características de humedad del suelo (McLaughlin, 2005). Tales características de diversidad, productividad y humedad son en cierta medida la base de los servicios ecosistémicos que los ERZA proveen. En la Tabla 1 se presentan algunas características de ecosistemas ribereños en zonas templadas y en zonas áridas, su importancia ecológica y algunas alteraciones por actividades humanas.

De acuerdo con el estudio realizado en 2009 por Scott y colaboradores, las principales especies de árboles (tomando en cuenta cobertura y frecuencia) en ecosistemas ribereños en Sonora son *Salix goodingii*, *Salix bonplandiana*, *Prosopis velutina* y *Populus fremotii*. En tal estudio se registró también que la diversidad de especies leñosas aumenta, en la mayoría de los arroyos muestreados en el estado, de norte a sur.

Una de las principales características de los ERZA es que las corrientes de agua superficial a lo largo de las cuales se desarrollan, son a menudo efímeras; sin embargo, las especies vegetales en estos ecosistemas dependen de flujos constantes de agua, principalmente subterráneos, para establecerse y desarrollarse. Las especies ribereñas tienen la característica de ser freatofitas, ya que presentan un sistema radicular profundo que tiene la capacidad de alcanzar el agua subterránea, otras especies comunes en zonas áridas (como el mezquite) también han desarrollado esta característica debido a la necesidad de acceder al agua en sitios donde la tabla de agua es profunda; sin embargo, la capacidad de desarrollar raíces extremadamente profundas difiere sustancialmente entre especies ribereñas y desérticas. Se ha registrado que algunas especies de *Populus* y *Salix* prosperan en sitios donde la profundidad del agua subterránea es menor a 4 metros (Stromberg y Lite, 2005), y se ha observado que *Salix* es más dependiente del agua subterránea que *Populus* (Snyder y Williams, 2000); por

otro lado, *Prosopis velutina*, ha reportado tener raíces de hasta 15 metros de profundidad (Lite *et al.*, 2005). La especie invasora *Tamarix ramosissima* (pino salado) ha demostrado ser dominante en sitios en donde el agua subterránea es más profunda y la corriente superficial esporádica, además de ser más tolerante a la baja humedad y alta salinidad del suelo, en comparación con especies ribereñas nativas (Busch y Smith, 1995); el pino salado constituye un problema grave de invasión en muchas áreas ribereñas del suroeste de los Estados Unidos (Brock, 1994).

Tabla 1. Diferenciación de ecosistemas ribereños mexicanos según la región en donde se desarrollan.

Ecosistemas Ribereños		
	Zonas templadas	Zonas áridas
Tipo de corriente	Perenne	Intermitente o efímera
Extensión (% territorio)	.08% (territorio nacional)	0.1 a 0.5% (territorio Sonora)
Vegetación	Bosque de galería (se desarrolla a lo largo de corrientes más o menos permanentes). Diversas especies de <i>Platanus</i> , <i>Populus</i> , <i>Salix</i> , <i>Taxodium</i> (en sitios de más de 2800 msnm).	Escasa. <i>Salix</i> , <i>Populus</i> , <i>Cercidium</i> , <i>Acacia</i> , <i>Prosopis</i> , en las orillas del río. Mayor diversidad que en ecosistemas adyacentes.
Precipitación y temperatura	Cosmopolitas. Se encuentran en lugares de clima variable.	<300mm año ⁻¹ , -18 a 40°C.
Zona de transición	No se distingue claramente, hay un traslape considerable entre la vegetación ribereña y la adyacente.	Crítica, muy marcada, pues el cambio en la vegetación es drástico. Generalmente la vegetación ribereña es más densa que la de ecosistemas adyacentes.
Importancia ecológica y servicios ecosistémicos	Provisión y soporte, regulación de procesos bióticos y abióticos. Flujo de energía y nutrientes, infiltración a mantos freáticos, hábitat para diversas especies, actividades económicas, sitios recreativos. Promueven la biodiversidad.	Funciones de provisión y soporte, indicadores del estado del ecosistema, procesos hidrológicos. Refugio para animales, reguladores de la temperatura del agua, actividades económicas. Promueven la biodiversidad.
Alteraciones	Agricultura, urbanización, remoción de la vegetación, contaminación.	Agricultura y ganadería, desvío del cauce natural, presas y pozos (sobreexplotación), contaminación.

Elaboración propia con base en: Naiman *et al.*, 1993; Jackson *et al.*, 2001; Carabias y Landa, 2005; Brauman *et al.*, 2007; Sánchez *et al.*, 2009; Scott, *et al.*, 2009; Moreno *et al.*, 2010; Ruelas *et al.*, 2010.

McLaughlin (2004), clasifica de manera sencilla la vegetación presente en ERZA como: ribereñas obligadas (aquellas especies que se encuentran exclusivamente en zonas ribereñas o acuáticas), ribereñas facultativas (las que se pueden encontrar tanto en zonas ribereñas como en zonas exclusivamente desérticas) y no ribereñas (raramente las encontraremos en zonas ribereñas).

A pesar de que es común encontrar especies ribereñas facultativas integradas en el ecosistema ribereño (como por ejemplo algunas especies del género *Prosopis* o *Acacia*), una alta frecuencia en la presencia de éstas, o de otras especies no ribereñas, puede servir como un indicador de disturbio ambiental o humano, ya que estas especies están más adaptadas a la sequía y su presencia podría indicar que las condiciones del ecosistema no permiten el establecimiento de las especies ribereñas obligadas.

Los ERZA en el Noroeste Mexicano, constituyen apenas entre el 0.1 y el 0.5 % de la cobertura total de ecosistemas en la región (Folliott *et al.*, 2004; Zaimes, 2007; Scott *et al.*, 2009). Estos ecosistemas han sido a menudo impactados por actividades productivas tales como agricultura, ganadería, minería y urbanización (López, 2001; Gómez *et al.*, 2003; Moreno *et al.*, 2010) y factores ambientales tales como la fluctuación climática asociada a eventos de sequía (IPCC). Se estima que en Sonora la vegetación ribereña ocupa un área de 2,301 km², de la cual 34% ha sido transformada para su uso agrícola (Scott *et al.*, 2009).

Varios estudios resaltan la importancia de los ERZA y el impacto de las diferentes actividades humanas sobre éstos (Roach *et al.*, 2008; White y Stomberg, 2011; Villarreal *et al.*, 2012; Ely *et al.*, 2013). Los ERZA suministran servicios de provisión, regulación, culturales y de soporte, que resultan esenciales para el desarrollo y mantenimiento de las actividades humanas (Allan, 2004; Zaimes, 2007; Scott *et al.*, 2009; House-Peters y Scott, 2011; Poff *et al.*, 2011). Las alteraciones en la vegetación de los ERZA pueden alterar también su funcionamiento, lo cual a su vez puede tener efectos sobre la provisión de servicios ecosistémicos.

Ejemplos de alteraciones en la vegetación de ecosistemas ribereños en zonas áridas se han registrado en la cuenca del Río San Pedro, principalmente en la porción localizada en Arizona. Por medio de una caracterización espacial se observó una evidente degradación del

sistema: disminución de biomasa, cambios en la cobertura vegetal, incremento en procesos erosivos, disminución en las comunidades nativas de pastizales y matorral desértico (Kepner, 2000). También se observó en la misma zona un reemplazo de especies nativas ribereñas por especies exóticas debido a un decremento en el nivel de agua subterránea (Stromberg, 1998).

I.2. Disturbio y perturbación en ERZA

El disturbio, como lo definen White y Pickett (1985), es un evento relativamente discreto en el tiempo que provoca cambios abruptos en la estructura del ecosistema, la comunidad o la población y que cambia el ambiente físico modificando la disponibilidad de recursos o sustratos. Existen muchos factores causales de disturbio tales como el fuego, la acción del agua y del viento, los terremotos y erupciones volcánicas, los animales, las enfermedades o plagas y la actividad humana (Gurevitch *et al.*, 2006). A diferencia de los eventos de disturbio, la perturbación puede darse de manera continua o frecuente a través del tiempo, produciendo un cambio en los regímenes o ciclos naturales y dando lugar a una transformación (Leuschner, 2013).

Los efectos de la perturbación pueden resultar en distintos grados de alteración de las comunidades naturales dependiendo de la intensidad de los factores causales. Algunas veces se elimina la cobertura vegetal por completo y otras veces se producen huecos que fragmentan el ecosistema en partes más pequeñas y aisladas. La fragmentación como producto del cambio de uso de suelo es actualmente considerada como la amenaza más grave para la biodiversidad de las comunidades vegetales (Gurevitch *et al.*, 2006). En la Tabla 2 se muestran algunas afectaciones a ecosistemas ribereños como causa de actividades humanas.

Existen numerosas maneras de estudiar los efectos de la perturbación en los ecosistemas, así como diversos índices para evaluar su estado de integridad, muchos de ellos incluyen el análisis de la vegetación.

Tabla 2. Consecuencias de la perturbación por actividades humanas en Ecosistemas Ribereños en Zonas Áridas.

Principales actividades en ERZA	Alteraciones consecuentes	Impactos en la vegetación
Desvío, almacenamiento y extracción de agua: presas, embalses y pozos (uso municipal, industrial e irrigación)	<p>Aguas arriba de la presa: Transformación del ecosistema de río a lago. Aumenta el nivel del agua y disminuye la velocidad de las corrientes. Los bancos de los ríos pierden estabilidad. Aumenta la superficie del agua y con ello las tasas de evaporación.</p> <p>Aguas abajo de la presa: Disminución de las corrientes superficiales y subterráneas. Disminución de sedimentos acarreados por la corriente natural. Reducción de la densidad de perifitón. Problemas de calidad y reducción del recurso (agua).</p>	<p>Aguas arriba de la presa: Inundación de las orillas del río y pérdida de la vegetación por asfixia.</p> <p>Aguas abajo: Flujo de agua insuficiente para la germinación de algunas especies, arrastre de semillas por las descargas administradas. Reducción en el reclutamiento de especies. Disminución de la diversidad. Reducción del vigor de la vegetación y/o pérdida de ésta. Incrementa el potencial de establecimiento de especies invasoras. Disminución en la riqueza y densidad de especies herbáceas.</p>
Colecta de leña	<p>Incremento de áreas desprovistas de vegetación. Aceleración de procesos erosivos y de escorrentía.</p>	<p>Pérdida de especies leñosas y pérdida de hábitat.</p>
Ganadería	<p>Apisonamiento y compactación de suelos. Desestabilización de las orillas de los ríos y eliminación de sitios de germinación. Incremento de carga de sedimento en las corrientes. Descarga de residuos de materia fecal. Salinización del agua.</p>	<p>Dstrucción de la cubierta vegetal, principalmente del estrato herbáceo. Alteración de ciclos reproductivos debido al ramoneo de plántulas. Cambios en la estructura, composición y productividad de la vegetación.</p>
Agricultura	<p>Disminución de las corrientes superficiales y subterráneas. Alteraciones en la estructura del suelo. Incremento en procesos erosivos. Remoción directa de la vegetación. Descarga de residuos agroquímicos contaminantes. Salinización del agua.</p>	<p>Debilitamiento y pérdida de la vegetación. Pérdida de hábitat. Pérdida de la capacidad de amortiguamiento de agua y sedimentos.</p>
Minería	<p>Alteración del paisaje. Conversión de valles naturales en asentamientos de desechos contaminantes sólidos y líquidos. Disminución del nivel de agua</p>	<p>Dstrucción del ecosistema ribereño por enterramiento con escombros. Eliminación parcial y total de especies por efectos de la contaminación.</p>

	subterránea. Reducción en el flujo de arroyos y manantiales. Contaminación química del agua y suelo.	
Urbanización y construcción de caminos	Aumento en la demanda de agua para uso urbano. Disminución de las corrientes superficiales y subterráneas. Redirección y estrechamiento de ríos por ampliación de caminos.	Reducción de reclutamiento y establecimiento de las especies debido a la falta de agua. Establecimiento de especies invasoras.
Uso recreativo	Compactación de suelo, remoción de la vegetación. Contaminación de agua, suelo y aire por sólidos y gases.	Eliminación de la cobertura vegetal, principalmente herbáceas, plántulas y árboles juveniles. Disminución de la regeneración. Pérdida de vigor en árboles. Incremento en la susceptibilidad a plagas. Incrementa el potencial de establecimiento de especies invasoras.
Alteraciones biológicas	Especies invasoras, introducidas como ornamentales o forrajeras, que se han naturalizado. Algunas de estas se establecen fácilmente en hábitats perturbados y tienen mayor tolerancia a la sequía.	Competencia, desplazamiento y reemplazo de especies nativas ribereñas.

Elaboración propia con base en: Patten, 1998; Zaimes, 2007; Poff, 2011.

I.2.1. Casos de estudio - Alteraciones de los ecosistemas ribereños

González y García (2011) elaboraron un índice de calidad ribereño (RQI, por sus siglas en inglés) para evaluar la condición ambiental de los ecosistemas ribereños, creando 5 categorías de calidad para 7 criterios que incluyen características de la vegetación, como continuidad, regeneración, distribución y composición, así como factores hidrológicos como la condición de los márgenes del río y la conectividad.

Mendoza (2014), evaluó la composición y estructura de la vegetación ribereña para utilizarla como indicador de salud de un río en el estado de Hidalgo, en donde existen fuertes problemas ambientales debido a la práctica de la agricultura intensiva y a la emisión de contaminantes al efluente. Dicho indicador en conjunto con la aplicación del índice de calidad ribereño (RQI) sirvieron para diagnosticar 5 sitios del río Metztlán con estados ecológicos “moderado” y “pobre”, y proponer medidas de restauración o rehabilitación.

Ramírez (2010), analizó la vegetación ribereña y junto con otros parámetros (geomorfológicos y edafológicos) elaboró índices de vulnerabilidad para valorar el estado ecológico del ecosistema ribereño en los ríos de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, en el estado de México. Uno de los segmentos estudiados mostró un elevado aporte de sedimentos y una gran cantidad de especies vegetales introducidas; el segundo segmento estudiado mostró mayor capacidad de recuperación, asociada a una vegetación en buen estado. La valoración realizada logró estimar el grado de perturbación en la zona e identificar el componente biótico y abiótico más afectado y se propone como una herramienta para establecer medidas de aprovechamiento y manejo del agua.

Villaseñor (2007), consideró dos categorías de perturbación para caracterizar segmentos de ecosistema ribereño en diferentes ríos sonorenses, para conocer el efecto del disturbio en la presencia de aves de invierno. Clasificó sus sitios de muestreo como “relativamente sin disturbio” cuando había segmentos continuos de vegetación ribereña con presencia de especies arbóreas nativas, así como reclutamiento de éstas, y una distancia de 2 km o más entre el sitio y asentamientos humanos y de al menos 200 metros entre el sitio y los campos agrícolas; y clasificó como “altamente perturbados” aquellos sitios en donde se percibía fragmentación en el los segmentos de vegetación ribereña con presencia de especies nativas y exóticas arbóreas, ausencia de reclutamiento y una distancia menor a 2 km entre el sitio y asentamientos y menor a 200 metros entre el sitio y campos agrícolas. De esta manera encontró que el grado de disturbio no necesariamente afectaba a la composición de las comunidades de aves, sin embargo, se registraron niveles altos de estrés fisiológico en los individuos muestreados en los sitios con disturbio.

En el mismo estado, se determinó mediante un muestreo de la vegetación, que en algunos sitios del río Sonora la alta mortalidad de árboles ribereños es evidencia concreta del daño ambiental provocado por el derrame de un represo minero en el 2014 (UNAM, 2016).

Los ejemplos anteriores demuestran que el estudio de la vegetación es un elemento principal para la determinación del grado de disturbio en los ecosistemas y debe ser utilizado en la elaboración de diagnósticos de integridad ambiental.

I.3. Actividades productivas y sus impactos en los ríos de Sonora

El estado de Sonora tiene una extensión de 180,000 km², ocupa aproximadamente el 9% del territorio nacional y es el segundo estado más grande del país; sin embargo, su densidad poblacional es muy baja: 16 habitantes por kilómetro cuadrado, en comparación con la media nacional que es de 61 habitantes por kilómetro cuadrado. La población total de Sonora, con base en el último censo del 2010, era de 2,662,480 habitantes, de los cuales el 78% vivía en localidades urbanas (INEGI, 2011); se proyecta que para el 2017 habrá 3,011,810 habitantes (CONAPO, 2015).

A pesar de que el 95% del territorio tiene climas secos (Brito-Castillo *et al.*, 2010), la presencia de ambientes geográficos diversos propicia que el estado albergue un importante número de ecosistemas y una biodiversidad considerable. Sin embargo, Sonora es un estado mayormente desértico y con un clima extremo, tiene una temperatura máxima promedio de 38°C y una precipitación media anual de 450mm (INEGI, 2016); lo anterior puede ser una limitante para el establecimiento de grandes centros poblacionales, así como para la implementación de actividades productivas, debido principalmente a la falta de agua.

Sonora, al igual que gran parte de nuestro país, no es la excepción en cuanto al uso desmedido de recursos naturales. Las actividades productivas que sostienen la economía del estado nunca consideraron dentro de sus planes de desarrollo una administración ecológicamente viable de los recursos utilizados y las consecuencias ambientales de esta falta de visión son muy claras hoy en día.

Aunque la mayor parte (94%) de la producción de bienes y servicios en Sonora se concentra en los sectores secundario y terciario (INEGI, 2016b), las actividades primarias ocupan la mayor parte de la superficie del estado y, junto con el desarrollo urbano, están consideradas como las principales causantes de cambio en los ecosistemas sonorenses (Búrquez y Martínez-Yrizar, 2000). Estos cambios también han impactado de diversas maneras a los ecosistemas ribereños, ya que una parte importante de la producción primaria en el estado está establecida cerca de los ríos. Los principales ríos en Sonora (de Oeste a Este) son: río Colorado, río Sonoyta, río Magdalena (con principal tributario Altar), río Sonora (con sus tributarios Bacanuchi y San Miguel), río Yaqui (sus tributarios Bavispe, Sahuaripa y

Moctezuma) y río Mayo, localizado al sur del estado. Existen registros de problemas ambientales y socio-económicos generados por la actividad humana en la mayoría de las cuencas antes mencionadas.

A continuación, se describen algunos detalles importantes relativos al desarrollo de actividades primarias (agricultura, ganadería y minería) en el estado y sus impactos ecológicos en los ríos.

I.3.1. Agricultura

En Sonora aproximadamente el 6.9% de la superficie se encuentra destinada a actividades agrícolas (INEGI, 2016a). Sin embargo, se considera que al menos el 50% de la extensión del estado (principalmente la zona del oeste) tiene potencial para algún uso agrícola.

Los centros agrícolas más importantes (por extensión y producción) están ubicados en la zona de la costa de Hermosillo (municipio de Hermosillo), y al sur del estado en el valle del río Yaqui (municipios de Cajeme, Bécum y San Ignacio Rio Muerto) y el valle del río Mayo (municipios de Benito Juárez, Navojoa, Etchojoa y Huatabampo). Otras regiones agrícolas importantes, aunque de menor extensión, se encuentran a lo largo de las riberas de los ríos Asunción (municipios de Caborca, Pitiquito y Altar), río Sonora y río San Miguel, en el caso de éstos dos últimos, la mayor actividad se concentra sobre todo en la parte correspondiente al municipio de Hermosillo. Los principales cultivos son: trigo, vid, nogal, sorgo y alfalfa.

La agricultura en Sonora mantiene primeros lugares nacionales en producción de espárrago, uva y trigo, cuyo cultivo implica un alto consumo de agua (Fimbres y Lizárraga, 2009; Salazar *et al.*, 2012), un uso extensivo del terreno y la utilización de agroquímicos contaminantes (Martínez, 2003). Varios trabajos han documentado afectaciones en la salud de jornaleros y de la población en general que reside en las principales zonas agrícolas del estado, por la exposición a plaguicidas (Silveira *et al.*, 2016; Calvario, 2007; Camarena *et al.*, 2014; Haro, 2007.).

Los problemas ecológicos asociados a esta actividad tienen que ver principalmente con el cambio de uso de suelo y con el uso, disponibilidad y calidad del agua, ya que la mayor parte del agua concesionada en Sonora está destinada al uso agrícola (CONAGUA, 2015b). Lo anterior, además de generar conflictos sociales entre los usuarios por la falta de planeación en el manejo del recurso (Navarro-Navarro *et al.*, 2017), aunado a los eventos naturales de sequía, genera una disminución en la disponibilidad de agua para los ecosistemas lo cual se traduce en su deterioro (Ruelas *et al.*, 2010).

Otra situación grave asociada a la actividad agrícola en Sonora es la intrusión salina, la cual sucede cuando la sobreexplotación de los acuíferos provoca la movilización de aguas fósiles o aguas marinas que contienen sales y minerales nocivas para la salud ambiental y humana (Carabias y Landa, 2005), disminuyendo así la calidad del agua y del suelo y provocando el abandono de campos agrícolas (Romo-León *et al.*, 2014). Este proceso puede dar lugar a una diversificación de actividades productivas que implican una pérdida total de la vegetación nativa como, tal como se ha visto en la costa de Hermosillo debido al desarrollo de la acuicultura y la producción de carbón de mezquite (De La Torre y Sandoval, 2015).

Actualmente los principales valles agrícolas en el estado presentan problemas de contaminación por el uso indiscriminado de agroquímicos (el cual tiene una historia de al menos 50 años de uso en la región), y aunque los efectos en la salud humana se encuentran bastante documentados (Moreno y López, 2005), es notable la carencia de estudios ecológicos que indiquen los efectos de esta contaminación en los ecosistemas.

Otras problemáticas asociadas al desarrollo de la actividad agrícola incluyen la construcción de presas y los cambios en el paisaje ocasionados por dicha infraestructura. Evans (2006) describe la transformación de 55,000 hectáreas a lo largo del río Bavispe y el valle de Teras por la construcción de la presa La Angostura entre 1930 y 1940, por efecto de la inundación que ésta ocasionó en los cañones que bordean el río.

Búrquez y Martínez-Yrizar (1997) registran que en los deltas del río Yaqui y río Mayo han desaparecido 1,000,000 de hectáreas de bosques ribereños de mezquites, álamos y sauces, así como de matorral espinoso costero, después de la construcción de presas río arriba. Otros autores (Cuevas *et al.*, 2010) registran que el río Sonora y el río Yaqui conservan más del 80%

de su vegetación primaria; sin embargo, ambas cuencas presentan un grado de conectividad muy bajo, indicando que la vegetación se encuentra altamente fragmentada, lo cual condiciona su capacidad para mantener la provisión de servicios ecosistémicos.

En el río San Miguel (municipios de Cucurpe, Opodepe, Rayón y San Miguel de Horcasitas) existe actualmente una superficie de 10,432 hectáreas destinadas a la agricultura de riego y 13,146 hectáreas destinadas a la agricultura de temporal (INEGI, 2007). Es importante mencionar que el 75% de la superficie irrigada corresponde a cultivo de forrajes (Navarro-Navarro *et al.*, 2017). Hasta la fecha no se tiene un cálculo preciso sobre los impactos que dicha actividad ha tenido sobre los ecosistemas ribereños en esta zona.

I.3.2. Ganadería

La actividad pecuaria en Sonora incluye principalmente la cría de bovinos y equinos. Para el 2014 existían 1,666,074 cabezas de ganado bovino, de las cuales 1,000,000 se encontraban bajo un manejo de libre pastoreo (INEGI, 2016a).

La ganadería extensiva ocupa 84% de la superficie estatal (López *et al.*, 2010); sin embargo, debido a la naturaleza desértica de los ecosistemas sonorenses y la ausencia de forrajes naturales en el estado, se ha impulsado la conversión de pastizales nativos a pastizales inducidos.

En un periodo de 25 años (1976-2000) se transformaron a nivel nacional casi 13 millones de hectáreas de vegetación nativa a pastizal inducido (Bravo *et al.*, 2010). De acuerdo a cifras oficiales (INEGI, 2016a) Sonora cuenta con un total de 1,976,664 hectáreas de pastizales, de las cuales el 50% corresponde a pastizal natural, 26% a pastizal cultivado y 23% a pastizal inducido.

La introducción de especies exóticas como alternativas forrajeras ha causado la pérdida de comunidades vegetales nativas, ya que, en el caso del zacate *buffel*, éste se ha expandido a sitios fuera de donde fue sembrado originalmente, conformando ecosistemas nuevos denominados “pastizal de zacate buffel” (Martínez-Yrizar *et al.*, 2010). Los impactos en los ecosistemas sonorenses asociados a la introducción de forrajes, como se mencionó

anteriormente, incluyen pérdida de biodiversidad y riqueza, así como cambios en la estructura de la vegetación. De igual manera, el sobrepastoreo ligado a la ganadería tiene efectos directos sobre la cubierta vegetal.

Debido al cambio de uso de suelo implícito en la introducción de forrajes no-nativos, se han estudiado más ampliamente los impactos de la ganadería sobre todo en las áreas centrales del estado y con un enfoque sobre los ecosistemas de matorral desértico y pastizales naturales, pero existe poca información con respecto a ecosistemas ribereños. Sin embargo, en términos de uso del recurso hídrico, hay datos útiles para establecer un panorama de afectación sobre los ecosistemas ribereños, ya que se sabe que para producir 1 kg de carne se requieren hasta 200,000 litros de agua (Búrquez y Martínez-Yrizar, 1997).

En el río San Miguel (municipios de Cucurpe, Opodepe, Rayón y San Miguel de Horcasitas) existen 73,989 cabezas de bovinos (INEGI, 2007), para cuya manutención se utiliza el agua superficial y subterránea proveniente de dicho acuífero.

I.3.3. Minería

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SE, 2016), en Sonora existen actualmente 141 proyectos mineros, de los cuales 46 se encuentran en explotación, 30 en etapa de exploración avanzada y 65 en exploración. El estado tiene el primer lugar nacional en extracción de cobre y oro, con 483,510 toneladas y 42,592 kilogramos anuales respectivamente (SE, 2016); en términos económicos, la actividad minera contribuye con el 12% al PIB local (INEGI, 2016a).

Dicha actividad, privilegiada por los gobiernos federal y estatal, así como por las laxas regulaciones aplicadas a las empresas extractivas, ha sido ampliamente documentada por grupos activistas y académicos (De la Fuente et al., 2017; Alfie, 2015) debido a los conflictos socio-ambientales que ha provocado en el estado.

Los procedimientos empleados en la extracción y procesamiento de minerales implican el uso y liberación de diversas sustancias tóxicas (como el cianuro utilizado en la extracción de oro) que afectan la salud de los mineros y terminan depositados en el agua y el suelo

afectando así al resto de la población y a los sistemas naturales. Las etapas de exploración, explotación/beneficio y fundición/refinación destruyen la vegetación y el suelo, afectan cuerpos de agua, generan terrenos inestables y jales (residuos minerales sin valor), provocan escurrimientos y arrastre de residuos de drenaje ácidos, descargan lixiviados y generación de diversos residuos peligrosos que son emitidos al ambiente (Volke *et al.*, 2005).

La contaminación en los ríos de Sonora como producto de los desechos mineros es histórica; existen evidencias de contaminación por metales pesados en el río San Pedro (Gómez-Álvarez *et al.*, 2004), así como en el río Sonora (Yocupicio y Gómez, 1987), también existen alteraciones en los ecosistemas en el río fronterizo Santa Cruz debido al aumento de minas de arena y grava (Solís *et al.*, 2011), se han analizado los riesgos de dispersión de contaminantes en pasivos mineros localizados en Nacozari y el riesgo que implica para la población cercana, así como para los afluentes del río Yaqui (de la O-Villanueva *et al.*, 2013). A raíz de uno de los eventos más recientes de contaminación por desechos mineros en el río Sonora ocurrido en el 2014, se registró una alta mortalidad de árboles ribereños y afectaciones a la integridad funcional de los ecosistemas (UNAM, 2016).

Actualmente en la sub-cuenca del río San Miguel existen dos proyectos mineros en explotación y cinco en etapa de exploración (Secretaría de Economía, 2016), lo cual constituye un riesgo de contaminación potencial con sus posibles consecuencias hacia los ecosistemas ribereños.

I.4. Río San Miguel – Antecedentes ecológicos y sociales

Todas las actividades anteriores (agricultura, ganadería y minería) tienen impactos directos sobre la disponibilidad y calidad del agua. La demanda de agua en Sonora (para uso agrícola, urbano e industrial) es principalmente cubierta mediante el uso de mantos subterráneos (CONAGUA, 2012). La región hidrológica Noroeste, que incluye la cuenca del río Sonora a la que pertenece el río San Miguel, mantiene un alto grado de presión sobre el recurso hídrico, ya que se concesionan 3,949 millones de metros cúbicos al año de los 4,958 millones de metros cúbicos que se recargan o se renuevan anualmente; además, esta región presenta sobreexplotación y problemas de calidad por intrusión salina (CONAGUA, 2015b).

En el caso de los ecosistemas ribereños, el efecto de las diversas actividades productivas ha sido poco estudiado o documentado. Lo anterior resulta alarmante, pues no existe un entendimiento preciso acerca de los procesos ecológicos y sociales, relacionados con la pérdida o intercambio de servicios que ocurren al modificarse la cobertura o el uso de suelo en estos ecosistemas.

A pesar de que los ERZA han sido poco estudiados, existen algunos trabajos que contribuyen al conocimiento ecológico de los ecosistemas ribereños en Sonora. También se han realizado investigaciones socio-económicas en la región, lo cual está estrechamente vinculado con el uso de recursos naturales. En total, los trabajos para la zona del río San Miguel suman apenas una veintena. A continuación, se presentan algunos estudios realizados en el río San Miguel.

Para la parte baja de la subcuenca del río San Miguel, en Sonora, Trujillo (2014) estudió las relaciones entre diversos parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo, y los tipos de vegetación presentes en el río (ribereña y mezquital). Se encontró que la concentración de fósforo total es menor en comparación con lo reportado para otras regiones. Se determinó que la proporción de carbono total y nitrógeno total es menor en los sitios de mezquital, de igual manera el mezquital presentó valores de pH menores que la vegetación ribereña, y los suelos de vegetación ribereña presentan mayor actividad micorrízica que los suelos de mezquital.

También para la parte baja de la subcuenca del río San Miguel se ha estudiado la estructura y diversidad de la vegetación ribereña (Galaz, 2016). Se registraron 154 especies para los cuatro sitios estudiados, encontrando que la diversidad alfa es mayor en los sitios con mayor perturbación.

Para diferentes sitios a lo largo de la subcuenca del río San Miguel, se ha descrito el uso de especies de árboles de la zona ribereña para construir cercos vivos que ayuden a proteger las parcelas agrícolas localizadas en los márgenes del río; en dicho estudio (Nabhan y Sheridan, 1977), los autores plantean que la práctica tradicional de los cercos vivos promueve la estabilidad del ecosistema ribereño, ya que evita la erosión en el margen del río y además sirve como nicho y refugio para varias especies de aves. Sin embargo, se ha discutido la

posibilidad de que esta práctica tradicional tenga efectos negativos en algunos sitios aguas abajo, agravando los efectos de inundación (Doolittle, 2003).

También se han realizado estudios sobre los impactos del cambio de uso de suelo en la cuenca del río San Miguel, desde una perspectiva socio-ecológica, determinando que la mayoría de los cambios en el sistema de la cuenca son predominantemente por causas antropogénicas (House-Peters y Scott, 2011).

Méndez y colaboradores (2016) analizaron dinámicas de cambio de cobertura y uso del suelo en la cuenca del río San Miguel y río Zanjón, encontraron que la vegetación ribereña presentó ligeros cambios en cuanto a cobertura para la serie de tiempo analizada: de 1993 a 2011 hubo un total de 625 hectáreas de vegetación ribereña transformadas o reemplazadas por otro tipo de vegetación o uso de suelo. Se observaron también cambios estructurales en la composición de la comunidad vegetal ribereña, debido a la expansión de los mezquiales aledaños, registrando un intercambio constante entre vegetación ribereña y mezquital. En este estudio también se encontró una relación entre el tipo de cobertura de suelo y los niveles de agua subterránea, se registró que la vegetación ribereña se distribuye en sitios en donde la profundidad media es de 9.9 metros, y en cambio los pastizales y zonas agrícolas se distribuyen en sitios en donde la profundidad fluctúa entre 35 y 45 metros. Este estudio resalta la importancia en la estabilidad de los niveles de agua subterránea para el mantenimiento de la vegetación ribereña. La sobreexplotación de las aguas subterráneas tiene impactos directos sobre los ríos, ya que los flujos naturales se ven afectados y las variaciones en la disponibilidad del agua afectan el desarrollo y establecimiento de la vegetación; muchas veces ocasionan una transformación completa en las comunidades vegetales que dependen de cierta constancia en los niveles de agua. En algunos sitios de la cuenca del río San Miguel ya se pueden observar estas transformaciones.

Las cifras oficiales sobre la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero del río San Miguel resultan confusas, tanto por el origen de los datos que utilizan para sus informes, como por la diferencia tan grande en la cantidad de agua referida. En primer lugar, la CONAGUA publica en 2009 una actualización en la que se determina que el acuífero tiene un déficit anual de 1,500,000 metros cúbicos al año, ya que el volumen concesionado de agua subterránea rebasa la capacidad de recarga natural del acuífero, que es de 52,500,000 de metros cúbicos al

año. En segundo lugar, en 2015 se publica otra actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, determinando que existe una disponibilidad de 17,508,107 metros cúbicos; sin embargo, según lo citado dentro del documento (CONAGUA, 2015a), el estudio en el cual se basaron para elaborar dicha actualización data del 2008.

La escasez de agua en la cuenca del río San Miguel es resultado de un incremento en el uso del recurso desde la década de 1940, debido a la tecnificación de las actividades productivas, así como por la intensificación en el uso urbano del agua, debido al crecimiento de la ciudad de Hermosillo; lo anterior tuvo impactos principalmente en la actividad productiva de los habitantes de la parte baja de la cuenca (Noriega, 2013).

Los problemas derivados del conflicto por el agua o por las dificultades que surgen de vivir en una región árida han sido estudiados desde diversas perspectivas. Por ejemplo, se sabe que en el ejido San Miguel de Horcasitas se ha desarrollado un conflicto por el uso del agua entre los usuarios de la unidad de riego de los Ángeles, en donde todos los miembros del ejido tienen derecho a utilizar el agua. Sin embargo, no se ha podido hacer una gestión eficiente del recurso, ya que algunos ejidatarios pierden sus cultivos por falta de acceso al agua. Las reformas a la legislación en materia de agua, la falta de sanciones por las instituciones correspondientes, el incumplimiento en los reglamentos, y los eventos de sequía dificultan el uso equitativo del agua entre todos los usuarios (Hernández, 2013).

Otro punto importante a destacar sobre el problema de la gestión del agua en el río San Miguel, es lo registrado en el estudio de Navarro y colaboradores (2017), en el que se ha identificado que gran parte del problema deriva de la desarticulación de los pobladores ya que solamente están al tanto de lo que pasa en sus municipios o ejidos y no se enteran de lo que ocurre en otras partes de la cuenca o de los efectos que sus decisiones tienen aguas abajo. Lo anterior denota la falta de una visión integral de lo que sucede con los recursos naturales en una cuenca hidrológica.

Las dificultades sociales observadas en el río San Miguel, tal como lo registra Lutz (2016), obedecen a una conjunción de factores (ambientales, socio-económicos y cambios institucionales) que representan un reto de adaptación para los pobladores rurales ante el

contexto actual de cambio global, en el que las modificaciones de los factores ambientales contribuyen a acrecentar los problemas sobre el uso de los recursos naturales.

Otra problemática que ha generado cambios socio-económicos para algunos ejidos localizados en la parte baja de la cuenca del río San Miguel, es la pérdida de agua para irrigación debido al crecimiento urbano de la ciudad de Hermosillo. La transferencia y redistribución de agua de uso rural a uso urbano ha afectado directamente a las comunidades ejidales, aumentando su vulnerabilidad ante la sequía y cambiando sus modos de vida forzando a muchos a emigrar (Díaz-Caravantes y Wilder, 2014; Díaz-Caravantes y Sánchez, 2011).

Los antecedentes aquí presentados enfatizan la necesidad de continuar el análisis de la vegetación ribereña en la cuenca del San Miguel para comprender cómo es que el uso del suelo, del agua y de los servicios está afectando a estos frágiles ecosistemas.

I.5. Percepción remota para el análisis de la vegetación

Una parte importante del presente trabajo incluye la utilización de técnicas de percepción remota para evaluar la condición actual de los ecosistemas ribereños de zonas áridas en Sonora. Dichas técnicas son útiles para cuantificar los cambios ocurridos a nivel del paisaje y estimar las pérdidas e intercambios entre los tipos específicos de vegetación que confluyen en la región de interés (Xie *et al.*, 2008).

La obtención de datos por medio de percepción remota y su procesamiento mediante Sistemas de Información Geográfica conforman un conjunto de herramientas y técnicas que han sido utilizadas en las ciencias naturales durante más de 30 años (Franklin, 2013; Gurevich, 2006). Los datos generados derivan de imágenes que se pueden obtener por medio de satélites (Landsat, IKONOS, MODIS), plataformas aéreas tripuladas (aviones, avionetas) o plataformas aéreas no tripuladas (helicópteros, multirotores, globos aerostáticos). El uso de estas herramientas para realizar un análisis espacial ha resultado muy práctico para la evaluación y monitoreo de recursos naturales y vida silvestre (Whitehead y Hugenholt, 2014; Zahawi *et al.*, 2015; Schiffman, 2014).

Mediante la utilización de imágenes obtenidas por percepción remota, podemos observar y cuantificar los cambios ocurridos sobre la superficie terrestre, este análisis facilita la visibilidad de los procesos de conectividad y fragmentación (Waring, 1993; Gurevitch *et al.*, 2006). Varios factores derivados de estas técnicas pueden ser utilizados como indicadores de la condición de los ecosistemas, por ejemplo, la descripción de los usos del suelo y la estimación de la cobertura vegetal, el uso de índices para calcular la productividad de algún tipo de vegetación específico, el análisis de cambio de uso de suelo a través del tiempo, la localización de zonas altamente fragmentadas o deforestadas (Ustin *et al.*, 1993; Cohen y Goward, 2004; Romo-León *et al.*, 2014; Romo-León *et al.*, 2013, Getzin *et al.*, 2014).

Muchos de estos procesos serían difícilmente cuantificables o casi imposibles de registrar si no existieran sensores de percepción remota como satélites y plataformas aéreas, los cuales permiten ampliar la escala de estudio de los sitios de interés. El uso de estas tecnologías puede constituir la base para obtener datos que sirvan para explicar cómo los ecosistemas están siendo modificados por las dinámicas de cambio de uso de suelo derivadas de actividades humanas, así como el efecto de cambios climáticos, como el aumento en las condiciones de sequía y la consecuente expansión de las regiones áridas en el mundo (desertificación).

Los casos de estudio presentados a continuación sirven como ejemplo para mostrar cómo diversas metodologías en percepción remota como el análisis de imágenes satelitales e imágenes aéreas son utilizadas para describir las características de la vegetación en diversos ambientes ribereños.

I.5.1. Casos de estudio – Metodologías en percepción remota

Temesgen y colaboradores (2013) realizaron un estudio de la sucesión de la vegetación por medio de imágenes satelitales de Landsat MSS, TM y ETM. A partir de las imágenes pudieron analizar la sucesión ecológica a lo largo de un gradiente de playa en un lago en Etiopía, que disminuyó en su capacidad debido a condiciones de sequía y al uso del agua en agricultura intensiva. Las series de tiempo analizadas mostraron dos diferentes patrones de cambio de uso y cobertura del suelo: para el primer período hubo un incremento en los sitios con vegetación

leñosa y una disminución en suelo desnudo, para el segundo período se registró lo contrario, lo cual coincide con una expansión en el uso agrícola y ganadero de la tierra, así como un aumento en las tasas de deforestación.

Johansen y Phinn (2006) utilizaron imágenes de alta resolución espacial del satélite IKONOS y de resolución moderada del satélite Landsat ETM, para desarrollar y evaluar un proceso de mapeo de parámetros de estructura y composición en ambientes ribereños en Australia; encontrando que se puede mapear el índice de área foliar (LAI por sus siglas en inglés) y el porcentaje de cobertura foliar del dosel (CPCF), pero con ciertas limitantes. El ancho de la zona ribereña se pudo identificar fácilmente debido a que el dosel y el pastizal producen una reflexión (de la luz) que contrasta fuertemente con la emitida por la savanna adyacente. Con las imágenes ETM no se pudieron identificar las zonas en donde el ancho era menor a 10 metros, estas imágenes sirvieron para medir y estimar el ancho de la zona ribereña mayor a 50 metros. Las técnicas de aumento aplicadas a la imagen IKONOS fueron esenciales para extraer información precisa sobre las propiedades de la vegetación ribereña, la aplicación de índices espectrales de vegetación y textura de imagen permitieron una mejor estimación de LAI y CPFC.

Akasheh y colaboradores (2007) utilizaron imágenes de alta resolución multiespectral para mapear vegetación ribereña en el Río Grande, Nuevo México, obtenidas por medio de un sistema digital diseñado por la Universidad de Utah y montado en una avioneta Cessna TP 206. Los autores destacan que el uso de esta tecnología es una herramienta precisa para indicar la condición y salud de ecosistemas ribereños. En sus resultados pudieron observar claramente cambios de distribución en donde especies invasoras están reemplazando a la vegetación nativa, así como áreas en donde el nivel de agua superficial ha disminuido y zonas en donde se observó un aumento en la cobertura de suelo desnudo.

Nguyen y colaboradores (2015) utilizaron imágenes satelitales de Landsat para derivar el Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) de la vegetación ribereña en una sección del río San Pedro. Sus resultados muestran una disminución en la actividad fotosintética de la vegetación en el período de tiempo analizado (1980-2015), sobre todo en la parte norte de la sección de río analizada. El estudio concluye

que el cambio climático, la extracción local de agua y el cambio en la intensidad de la precipitación son razones viables que explican el deterioro de la vegetación ribereña.

El uso de plataformas aéreas no tripuladas para la evaluación de los ecosistemas constituye una tecnología ideal para la ecología. Existen diversos estudios que han utilizado estas plataformas para mapear, clasificar, evaluar y monitorear ambientes ribereños en distintas partes del mundo (Jensen et al., 2011; Dunford et al., 2009; Tamminga et al., 2014) y se ha discutido el potencial de estas tecnologías como una herramienta que revolucionará la ciencia de la ecología del paisaje así como su utilización en proyectos de conservación de vida silvestre (Anderson y Gaston, 2013; Bryson et al., 2014; Koh y Wich, 2012; Evans, 2013; Whitehead y Hugenholtz, 2014; Grémillet et al., 2012; Ivosevic et al., 2015).

II. HIPÓTESIS

Los atributos de estructura, composición y funcionamiento de la vegetación ribereña de zonas áridas en Sonora, varían en función de los distintos usos de suelo que se desarrollan en la cuenca. La cobertura y diversidad vegetal disminuyen en sitios en donde la diversificación de usos de suelo asociados a actividades humanas aumenta, lo cual puede propiciar el establecimiento de especies de ecosistemas adyacentes dentro del ambiente ribereño.

III. OBJETIVOS

III.1. Objetivo general

Analizar la estructura, composición y funcionamiento de la vegetación en el Río San Miguel, en sitios con diferentes usos de suelo, por medio del análisis de imágenes aéreas de alta resolución, imágenes satelitales de mediana resolución y muestreo de la vegetación en campo.

III.2. Objetivos específicos

- Evaluar la perturbación con base en criterios observables en campo para la clasificación de los sitios estudiados.
- Estimar la cobertura y composición de la vegetación en campo, por medio de muestreos en sitios con presencia de disturbio en el río San Miguel.
- Analizar imágenes aéreas de alta resolución para determinar la cobertura de la vegetación y examinar su relación con el proxy de productividad Índice Mejorado de la Vegetación (EVI) obtenido de imágenes Landsat OLI/TIRS.
- Analizar las diferencias entre cobertura, composición y función de la vegetación ribereña y el matorral desértico adyacente al río.
- Analizar el reemplazo de la vegetación ribereña como consecuencia de los cambios de uso de suelo y discutir los posibles factores de cambio.

IV. MÉTODOS

IV.1. Área de estudio

El río San Miguel se encuentra ubicado entre las latitudes $30^{\circ}45.75'N$ - $29^{\circ}6.5'N$ y las longitudes $111^{\circ}4.11'$ - $110^{\circ}21.1'O$, en la región centro-norte del estado de Sonora. Este río constituye una sub-cuenca del Río Sonora y cubre una superficie de $3,845 \text{ km}^2$, limitando al norte con la Sierra Azul, al oeste con la Sierra de La Madera, Cucurpe y San Jerónimo, al este con la Sierra San Antonio, Los Locos, El Jucaral y El Aconchi, y al sur con la Presa Abelardo L. Rodríguez (Figura 1). El acuífero comprendido en el sistema, abarca parcialmente los municipios de Hermosillo, San Miguel de Horcasitas, Rayón, Opodepe y Cucurpe (SEMARNAT, 2009). La cuenca del río San Miguel dota de agua a una población de más de 10,000 habitantes (Tabla 3) y sostiene el desarrollo de agricultura a mediana escala (Félix, 2009).

Es importante señalar que, junto con el río Sonora, el río San Miguel es el afluente principal que abastece a la zona urbana de la ciudad de Hermosillo, desde la construcción de la presa Abelardo L. Rodríguez en 1942 (Noriega, 2013). El mayor usuario del acuífero está representado por el uso agrícola, seguido por el uso público urbano de las poblaciones de Cucurpe, Rayón, San Miguel de Horcasitas, La Fábrica de los Ángeles y otras rancherías, y finalmente por los usuarios del sector pecuario (SEMARNAT, 2009).



Figura 1. Localización del área de estudio

Tabla 3. Descripción socio-económica de los municipios de la sub-cuenca del río San Miguel.

Municipio	Población	Población económicamente activa	Porcentaje de la población ocupada que se dedica al sector primario
San Miguel de Horcasitas	9,081	3,922	80.98%
Rayón	1,444	675	42%
Opodepe	2,643	1,145	32%
Cucurpe	965	400	44%

Fuente: INEGI, 2015.

La temperatura media anual para esta región es de 21°C, con una oscilación de entre 10°C en los meses de noviembre a febrero, a 43°C entre junio y septiembre. La precipitación media registrada es de 421 mm, con un 70% de la misma distribuida en el monzón de verano (entre los meses de junio y agosto), y aproximadamente el 30% en la precipitación invernal (entre los meses de noviembre y enero) (Bravo-Peña *et al.*, 2009). La evaporación potencial estimada para la zona es de 2,400mm al año (SEMARNAT, 2009). La Sub-cuenca del río San Miguel se encuentra en la subdivisión del desierto sonorense denominada “Planicies de Sonora” según la clasificación de Shreve y Wiggins (1964), y corresponde a la designación de “desierto arbosufrutescente”, también conocida como región *Olneya-Encelia*. El Inventario Nacional Forestal (INF) de 2009 clasifica como tipos de vegetación dominante al Matorral Subtropical, Bosque y Mezquital para el río San Miguel. Se tiene registrada como actividad principal a la agricultura, la cual se concentra en las planicies de inundación de la sub-cuenca (Bravo-Peña, 2009).

IV.2. Selección de sitios de estudio y determinación del grado de perturbación

La revisión de sitios potenciales se realizó por medio de observaciones en Google Earth y visitas de exploración en campo. La selección final de los sitios se basó en la representatividad de las regiones en cuanto a las condiciones de uso de suelo y la accesibilidad al sitio. Por el hecho de que todos los sitios tenían acceso por medio de un camino, se considera que todos tienen influencia de actividades humanas en diferente medida, por lo que se asume que todos los sitios tienen cierto grado de perturbación.

Se seleccionaron 8 sitios de estudio a lo largo de la cuenca alta, media y baja del río San Miguel, los cuales fueron clasificados en diferentes categorías de disturbio en base a los siguientes criterios: presencia o ausencia de corriente superficial, presencia o ausencia de especies arbóreas representativas de ecosistema ribereño y tipo de uso de suelo/actividades humanas presente en los alrededores de cada sitio (ganadería, agricultura, caminos, asentamientos humanos, recreativo). Para cada criterio se estableció un valor que representa el grado de intensidad de acuerdo a lo observado en cada sitio, la asignación de valores se muestra en la Tabla 4.

Para la corriente superficial se clasificaron los sitios con corriente ininterrumpida con un **Si**, aquellos con corriente intermitente con **Poco** y aquellos en donde el lecho del río estaba seco con **No**. En cuanto a las especies representativas se clasificaron los sitios que tuvieran dominancia en presencia de sauces y/o álamos con **Sí**, aquellos en donde su presencia fuera menor a la de otras especies arbóreas se clasificaron con **Poco** y a los sitios en donde no se encontraron se les asignó un **No**. En lo referente a la presencia de ganado se clasificaron con un **Sí** aquellos sitios en donde se observaron vacas cerca del río o en sus alrededores, un **No** se les asignó a los sitios en donde no se observó ganado y un **Poco** se les asignó a los sitios en donde no se encontraron vacas, pero se observó evidencia de su presencia (heces, apisonamiento del terreno, ramoneo de plantas, presencia de zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*). Para la agricultura se le asignó un **Sí** a aquellos sitios en donde se observaron milpas o huertos alrededor de los ríos o en los alrededores (500 metros de distancia), se asignó un **No** a los sitios en donde no había huertas o milpas visibles cerca del río ni en los alrededores, y se asignó **Poco** a los sitios en donde se observaron milpas o huertas pequeñas de una extensión menor a 100 metros cuadrados (tamaño). En cuanto los caminos y asentamientos humanos se les asignó un **Sí** a los sitios en donde había casas y caminos cerca del río, **Poco** a aquellos sitios en donde había caminos, pero no asentamientos humanos y **No** a los sitios que no estaban cerca (500 metros de distancia) ni de caminos ni de casas. En lo referente a la actividad recreativa se clasificaron con un **Sí** aquellos sitios en donde era evidente la presencia humana frecuente (lugares para estacionar carros, asadores, botes de basura), con **Poco** aquellos sitios en donde es frecuente encontrar personas de paseo, pero no infraestructura, y con un **No** los sitios en donde no se observaron tales condiciones.

Se tomaron en cuenta 500 metros de distancia entre milpas o asentamientos humanos y el río ya que se considera que el cambio de uso de suelo desarrollado en ese rango de distancia puede afectar a la cobertura de la vegetación ribereña. También se consideró el tamaño de las milpas para asignar el valor, de más de 100 m² corresponden a agricultura comercial y se consideran que tendrán mayor influencia sobre el ecosistema ribereño y las milpas menores de 100 m² corresponden a agricultura de subsistencia y se considera que tendrán menor influencia sobre el ecosistema ribereño.

Al final de la evaluación se suman los valores para cada criterio y el resultado representa el índice de perturbación. La interpretación de los valores del índice de perturbación se muestra en la Tabla 5. Los rangos dentro del grado de perturbación resultante se estimaron de dos en dos debido a que las características son similares entre sitios que tienen valores similares, por lo que un grado de perturbación define de manera eficiente a los tres valores incluidos dentro del rango.

Tabla 4. Valores para cada criterio.

	Si	VALOR	Poco	VALOR	No	VALOR
Corriente superficial	Corriente continua	1	Corriente intermitente	2	Lecho del río seco	3
Presencia de <i>Populus</i> y/o <i>Salix</i>	Fueron las especies con mayor representatividad	1	Representatividad menor a otras especies arbóreas	2	Ausencia de éstas	3
Presencia/evidencia de ganado	Ausencia de ganado	1	Evidencia de ramoneo, heces, apisonamiento, zacate buffel	2	Presencia cerca del río o alrededores	3
Agricultura	No se observaron huertas o milpas cerca del río o alrededores	1	Presencia de huertas o milpas menores a 100m ² de extensión	2	Milpas o huertos a menos de 500m de distancia del río	3
Caminos y asentamientos humanos	Sitio localizado a 500m de distancia de caminos o casas	1	Presencia de caminos pero ausencia de casas	2	Casas y caminos cerca del río	3
Actividad recreativa	Ausencia de personas e infraestructura	1	Presencia de personas pero ausencia de infraestructura	2	Evidencia de presencia humana (estacionamiento de autos, asadores, botes de basura, basura)	3

Tabla 5. Interpretación de los valores.

IPb	Grado de perturbación
6-8	<u>Bajo</u> : no se observan evidencias de disturbio por actividades antrópicas en el sitio, la corriente de agua es continua (durante la temporada de lluvias) y la vegetación está dominada por especies representativas ribereñas.
9-11	<u>Bajo-medio</u> : existe la presencia de actividades humanas en baja intensidad, la vegetación ribereña domina.
12-14	<u>Intermedio</u> : la corriente de agua puede ser intermitente, las actividades humanas se diversifican, presencia de especies facultativas se mezclan con ribereñas.
15-17	<u>Medio-alto</u> : corriente de agua intermitente o inexistente, diversificación de actividades humanas, ausencia de especies ribereñas y dominancia de especies no-ribereñas.
18	<u>Alto</u> : no hay corriente de agua superficial, intensificación de actividades humanas, ausencia de especies ribereñas y dominancia de especies no-ribereñas.

Los criterios utilizados como indicadores de perturbación fueron desarrollados con base a las recomendaciones hechas por Lite y Stromberg (2005) y Stromberg y Richter (1996), en donde se establece que los usos humanos del agua han disminuido las corrientes subterráneas de los ríos en el suroeste de los Estados Unidos provocando disminución de las especies ribereñas *Populus fremontii* y *Salix gooddingii*. De igual manera se consideraron los criterios de agricultura, ganadería, asentamientos humanos y recreativo, por ser los principales usos de suelo registrados como causantes de alteración en los ecosistemas ribereños (Poff *et al.*, 2011; Zaimes, 2007; Stromberg *et al.*, 2005; House-Peters y Scott, 2011). La selección y desarrollo de criterios también se basó en lo reportado por González y García (2011), en el que se establece una metodología para evaluar las condiciones ambientales de zonas ribereñas.

IV.3. Caracterización de la estructura, composición y cobertura de la vegetación en campo

En cada sitio de estudio se establecieron dos unidades de muestreo (transectos) para vegetación, uno adyacente al río en donde se caracterizó la vegetación ribereña, y otro aproximadamente a 200 metros, en dirección opuesta del río, en donde se caracterizó la

vegetación de matorral desértico. Basándonos en nuestras observaciones en campo, consideramos que dicha distancia es suficiente para atravesar el área de transición entre vegetación ribereña y matorral desértico. Se muestrearon ambos tipos de vegetación para poder hacer una comparación de cobertura, diversidad, riqueza y actividad fotosintética entre sitios con disponibilidad de agua constante (ribereños) y sitios áridos (matorral). El rancho San Juan (en Opodepe) fue el único sitio en donde no se muestreó matorral desértico por restricciones de tiempo y climáticas.

A continuación, se describen los tipos de vegetación muestreados en campo:

El tipo de vegetación presente en los sitios adyacentes al río se denominó *vegetación ribereña*. Según el listado presentado por Scott *et al.* (2009), las especies predominantes en los ríos y arroyos sonorenses son *Populus fremontii*, *Salix gooddingii* y *Baccharis salicifolia*, las cuales son consideradas especies pioneras de estos ecosistemas (Stromberg *et al.*, 2010). También es común encontrar especies que no son exclusivamente ribereñas, tales como *Prosopis velutina*, *Celtis pallida*, algunas especies de *Lycium* y varias especies del género *Acacia*, así como algunas especies del género *Parkinsonia*.

Se denominó *mezquital ribereño* a la vegetación que presentó las características descritas por Stromberg (1993): los mezquites ribereños conforman asociaciones vegetales con la vegetación ribereña, y se establecen en sitios de mayor aridez; se encuentran en su mayoría dominados por *Prosopis velutina* o *Prosopis glandulosa*, otras especies presentes en menor frecuencia son *Celtis pallida* y *Acacia farnesiana*. Normalmente en estos sitios existe una nula o baja presencia de *Populus fremontii* y *Salix gooddingii*.

Aunque los tipos de vegetación desértica presentes en la zona de estudio varían en composición dependiendo de la latitud (Shreve y Wiggins, 1964), para fines prácticos se denominó como *matorral desértico* a la vegetación presente a una distancia de 150-200 metros del río. En esta zona predomina *Prosopis velutina*, *Celtis pallida*, *Mimosa laxiflora*, *Phaulothamnus spinescens*, algunas especies del género *Acacia*; también es común encontrar *Parkinsonia florida*, *Parkinsonia praecox*, *Parkinsonia aculeata*, varias especies cactáceas como *Lophocereus schottii*, *Stenocereus thurberii* y algunas especies del género *Cylindropuntia*.

El muestreo de la vegetación en campo se realiza por medio del método de *relevé* (Mueller-Dombois y Ellenberg, 1974). El método consiste en la designación de un transecto (stand) como unidad de muestro, establecido bajo los criterios de integridad en composición y estructura, lo anterior se refiere a que la vegetación debe ser homogénea dentro del transecto de muestreo. El transecto tiene forma rectangular, mide 90 x 30 metros y cubre un área total de 2700 metros cuadrados. Se realizaron dos transectos en cada sitio, uno en vegetación ribereña en los márgenes del río y otro en matorral desértico a 150 metros del río.

Dentro de cada transecto se registran las especies vegetales encontradas, para aquéllas que no puedan ser identificadas en campo se colecta un espécimen y fotografías para su posterior identificación en herbario. En cada transecto se cuenta el número de individuos por especie para obtener la densidad, y se hace una estimación porcentual de la cobertura para cada estrato (arbóreo, arbustivo y herbáceo) por medio de observación directa.

En la Tabla 6 se describen las variables calculadas a partir de los transectos establecidos en campo.

Con el fin de estandarizar las mediciones de la vegetación en campo, los transectos son divididos de la siguiente manera para la medición de cada estrato (árboles, arbustos, hierbas):

- El transecto principal de 30 por 90 metros se divide en cuadrantes de 30 por 30 (Figura 2 A). Dentro de éstos se registra la composición, densidad y cobertura total del estrato arbóreo.
- Dentro de cada cuadrante de 30 por 30 se marcan cuadros de 10 por 10 metros (Figura 2 B). Dentro de estos se registra la composición, densidad y cobertura del estrato arbustivo.
- Dentro de cada cuadro de 10 por 10 metros se marcan cuadros de 1 por 1 metros (Figura 2 C). Dentro de estos se registra la composición, densidad, y cobertura del estrato herbáceo.



Figura 2. Esquema del transecto y cuadrantes de muestreo

Tabla 6. Variables calculadas a partir de los datos obtenidos en el muestreo en campo.

Variable	Representación
Composición	Listado florístico
Densidad	Número de individuos por especie por transecto
Abundancia	Especies con mayor número de individuos
Cobertura	Porcentaje de cobertura por estrato en cada cuadrante
Diversidad	Índice de Shannon-Wiener (H')
Riqueza	Número de especies (árboles y arbustos) por sitio
Dominancia	Índice de Simpson (D)
Equitatividad	Índice de Shannon-Wiener (J)

A partir de dichas variables se realizaron diagramas estructurales para representar las características de cada sitio por medio de gráficas.

IV.4. Descripción de los índices de diversidad

Índice de Shannon-Wiener:

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \log_2 p_i$$

En donde: S es el número de especies, p_i es la proporción de individuos de la especie respecto al total de los individuos (n_i/N), n_i es el número de individuos de la especie y N el número de todos los individuos de todas las especies.

Índice de dominancia de Simpson:

$$D = \frac{1}{\sum p_i^2}$$

En donde: p_i es la proporción de la especie i en la comunidad.

Equitatividad para el índice de Shannon-Wiener:

$$J = \frac{H}{H_{max}} = \frac{H}{\ln S}$$

En donde: S es la riqueza de especies.

El índice de Shannon-Wiener expresa la diversidad de la comunidad vegetal. El índice de dominancia de Simpson calcula la probabilidad de que dos individuos elegidos al azar en una misma comunidad sean de la misma especie, lo cual indica si existen o no especies dominantes, es decir, con un mayor número de individuos que las otras especies, en la comunidad. La equitatividad del índice Shannon-Wiener explica cómo se distribuye el número de individuos de cada especie en la comunidad, mientras las abundancias de cada especie sean similares entonces la comunidad será más equitativa y viceversa (Gurevitch *et al.*, 2006).

El valor de los índices fluctúa entre 0 y 1. Para el caso de la diversidad los valores más cercanos a 1 indican comunidades más diversas; en cuanto a la dominancia los valores cercanos a 0 indican menor dominancia, es decir, que las abundancias para cada especie son similares; y en el caso de la equitatividad los valores cercanos a 1 indican una distribución similar en las abundancias de cada especie. Debido a que el índice de dominancia de Simpson nos indica la presencia de especies dominantes en los sitios, pero no especifica cuales, se consideraron las especies con mayor número de individuos por estrato como las dominantes, para cada sitio.

IV.5. Captura de imágenes aéreas de alta resolución espacial y derivación de ortomosaicos

En los mismos sitios en donde se realiza el muestreo de la vegetación se obtienen imágenes aéreas por medio de vuelos a 70 metros de altura, con la Plataforma Aérea No Tripulada (PANT) Inspire 1, equipada con una cámara FC 350 4000x2250 rojo, verde, azul (RGB, por sus siglas en inglés), con un ángulo de visión de 94°. Los vuelos se llevaron a cabo durante los meses de agosto, septiembre y octubre del año 2016. El ortomosaico resultante consiste en una escena que se obtiene como producto de la unión de todas las imágenes y cubre un área de aproximadamente 8 hectáreas.

En cada sitio se realizan dos vuelos, uno para obtener imágenes del área muestreada correspondiente a vegetación ribereña y otro para obtener imágenes del área muestreada correspondiente a vegetación de matorral desértico, aunque en algunos casos en un solo vuelo se cubrieron ambas áreas (Tabla 7). Todos los vuelos se realizaron bajo las siguientes condiciones ambientales: cielo despejado (para asegurar la obtención de imágenes claras y con iluminación estable), velocidad del viento menor a 30 km/hr (por las restricciones de la plataforma aérea), posición solar en cenit (para disminuir el efecto y distorsión de la sombra en las imágenes).

El recorrido de cada vuelo consta de 6 o 7 líneas paralelas de aproximadamente 250 metros de largo y separadas aproximadamente 35 metros una de la otra (Figura 3). A lo largo del recorrido se toman fotos aproximadamente cada 2 segundos, terminando con un total de aproximadamente 220 imágenes. Es necesario obtener la mayor cantidad de imágenes posibles para asegurar un traslape adecuado entre las fotografías (Pix4D, 2016) y tener una perspectiva de los objetos en la superficie desde diferentes ángulos. Finalmente se generaron ortomosaicos utilizando el software especializado Pix4DMapper, obteniendo imágenes con una resolución espacial aproximada de 3 cm, es decir que cada pixel del ortomosaico representa un área de 9 cm² de suelo.

Tabla 7. Ubicación espacio/temporal de cada vuelo realizado con la PANT. La R después del nombre del sitio indica los vuelos realizados sobre vegetación ribereña, la M indica matorral desértico. SMH es la abreviación del municipio San Miguel de Horcasitas.

Lugar	Municipio	Fecha del vuelo	Área del ortomosaico (m ²)	Área digitalizada (m ²)	Coordenadas (UTM Zona 12 N)	
					Long	Lat
Rancho Aguilar (R)	Rayón	13/08/16	70,000	56,700	542928	3273587
Ciénega (R)	Cucurpe	11/09/16	52,000	37,800	527575	3367150
Cercos Vivos (R)	Cucurpe	23/09/16	46,000	36,000	527792	3347829
El Cajón (R/ M)	SMH	08/08/16	71,000	57,600	525305	3260514
Nogalera (R/M)	SMH	08/08/16	77,000	63,000	516381	3247408
Rancho Aguilar (M)	Rayón	13/08/16	44,000	42,300	542689	3273563
La Galera (R)	Rayón	21/08/16	68,000	49,500	543372	3276731
La Galera (M)	Rayón	21/08/16	27,000	23,400	543564	3276741
Rancho San Juan (R)	Opodepe	03/09/16	51,000	37,800	532550	3318453
Ciénega (M)	Cucurpe	11/09/16	43,000	34,200	527748	3367093
Cercos vivos (M)	Cucurpe	21/09/16	38,000	27,900	527662	3347856
Rancho Tomás (R)	Opodepe	17/10/16	39,000	27,000	532661	3319181
Rancho Tomás (M)	Opodepe	17/10/16	40,000	31,500	532548	3319217



Figura 3. Imagen de Google Earth que muestra la ruta seguida por la PANT, los puntos rojos indican las imágenes capturadas.

IV.6. Obtención de imágenes satelitales de resolución espacial moderada

Para todos los sitios de estudio se obtuvieron imágenes satelitales multispectrales con una resolución espacial de 30 por 30 metros, es decir que cada pixel de la imagen satelital representa un área de 900 m². Específicamente se utilizaron imágenes obtenidas por los sensores OLI/TIRS (Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensors), montados en el satélite Landsat 8. Las imágenes fueron seleccionadas de la Pre-Colección L1T del sitio web ‘Earth Explorer’ del Servicio Geológico de los Estados Unidos, las cuales están calibradas radiométricamente y ortorectificadas por medio de datos obtenidos por puntos de entrenamiento y modelos de elevación.

Las imágenes de Landsat 8 OLI/TIRS incluyen 11 bandas (Tabla 8), de las cuales se seleccionaron 7 para ser procesadas en ERDAS IMAGINE 9.2. Las bandas 8, 9, 10 y 11 no se utilizaron en el proceso, por no ser necesarias para la derivación del índice de la vegetación.

Tabla 8. Asignación de bandas en Landsat 8 OLI/TIRS.

	Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución espacial (metros)
Landsat 8 Sensores OLI/TIRS	Banda 1 - Ultra Azul (costero/aerosol)	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromática	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Banda 10 - Infrarrojo termal (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100*(30)
	Banda 11 - Infrarrojo termal (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100*(30)

Debido a que la zona de estudio comprende dos escenas de Landsat 8, y para poder comparar la variabilidad entre dos temporadas (antes y después de lluvias), se seleccionaron 4 imágenes para dos fechas del 2016 (Tabla 9).

Tabla 9. Características de las escenas de Landsat 8.

Path and Row	Fechas antes de lluvias	Fechas después de lluvias	Resolución espacial
35/39	27/mayo/2016	16/septiembre/2016	30 x 30 m
35/40	11/mayo/2016	16/septiembre/2016	30 x 30 m

Una vez obtenidas las imágenes necesarias se procedió a derivar el Índice Mejorado de la Vegetación o Enhanced Vegetation Index (EVI) para las 4 imágenes, con el fin de obtener un proxy de actividad fotosintética.

IV.6.1. Derivación de índices de la vegetación

Los índices de vegetación derivados de imágenes satelitales se han desarrollado y utilizado desde la década de los 70's, estos índices son diseñados en base a la respuesta espectral de cada tipo de vegetación, es decir, el comportamiento de la luz solar sobre la superficie terrestre y su interacción con la vegetación (Bannari *et al.*, 1995). De esta manera los índices proporcionan medidas cualitativas y cuantitativas que sirven para describir variables de distintos tipos de vegetación, como la actividad fotosintética, características sobre la estructura y densidad de la cubierta vegetal, identificación de cultivos específicos, etc (Bannari *et al.*, 1995; Glenn *et al.*, 2008).

Comúnmente en zonas áridas se utiliza el Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) ya que resulta apropiado para ambientes que presentan una marcada estacionalidad. El NDVI funciona como un parámetro biofísico que reacciona ante la actividad fotosintética (Xie *et al.*, 2008), sin embargo, durante la temporada de crecimiento, en sitios con una densidad vegetal relativamente alta, el NDVI puede reflejar valores muy altos y con poca variación, lo cual se puede interpretar como una saturación de la señal espectral (Huete *et al.*, 2002).

Aunque el área de estudio se localiza en una zona árida por definición, las características de productividad y estructura específicas de la vegetación ribereña requieren de la aplicación de un índice menos propenso a la saturación de luz. Debido a esto, se seleccionó el índice EVI, pues este presenta mayor sensibilidad en áreas en donde la biomasa es abundante (vegetación densa), de esta manera se evita la saturación de luz; es por esto que los valores son generalmente menores cuando se les compara con los valores de NDVI.

El EVI se calcula mediante la siguiente operación:

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue} + L}$$

En donde ρ es la reflectancia de la superficie con corrección atmosférica, L es el ajuste de la radiación transferida a través del dosel, C_1 y C_2 son los coeficientes de la resistencia de aerosol, y G es el factor de ganancia. $L= 1$, $C_1= 6$, $C_2= 7.5$ $G= 2.5$ (Huete *et al.*, 2002).

Los valores del índice van del 0 al 1, los más cercanos a 1 indican una mayor densidad y actividad fotosintética, y los valores cercanos a 0 indican que la vegetación es escasa o que la actividad fotosintética es baja (Huete *et al.*, 2002).

IV.7. Combinación de imágenes de alta y mediana resolución

La imagen satelital procesada para adquirir el EVI arroja un producto en el que cada pixel tiene un valor específico dentro de la escala del índice, de tal manera que se puede analizar la relación entre los valores de actividad fotosintética y la cobertura estimada a partir de los ortomosaicos derivados mediante imágenes aéreas de alta resolución espacial obtenidas con PANT.

Una vez obtenidos los ortomosaicos a partir de las imágenes de PANT y calculado EVI a partir de las imágenes de Landsat, se hace una superposición de imágenes, colocando el ortomosaico sobre la imagen satelital. De esta manera se puede observar cada pixel de la imagen satelital representado en el ortomosaico en forma de una cuadrícula (Figura 4).

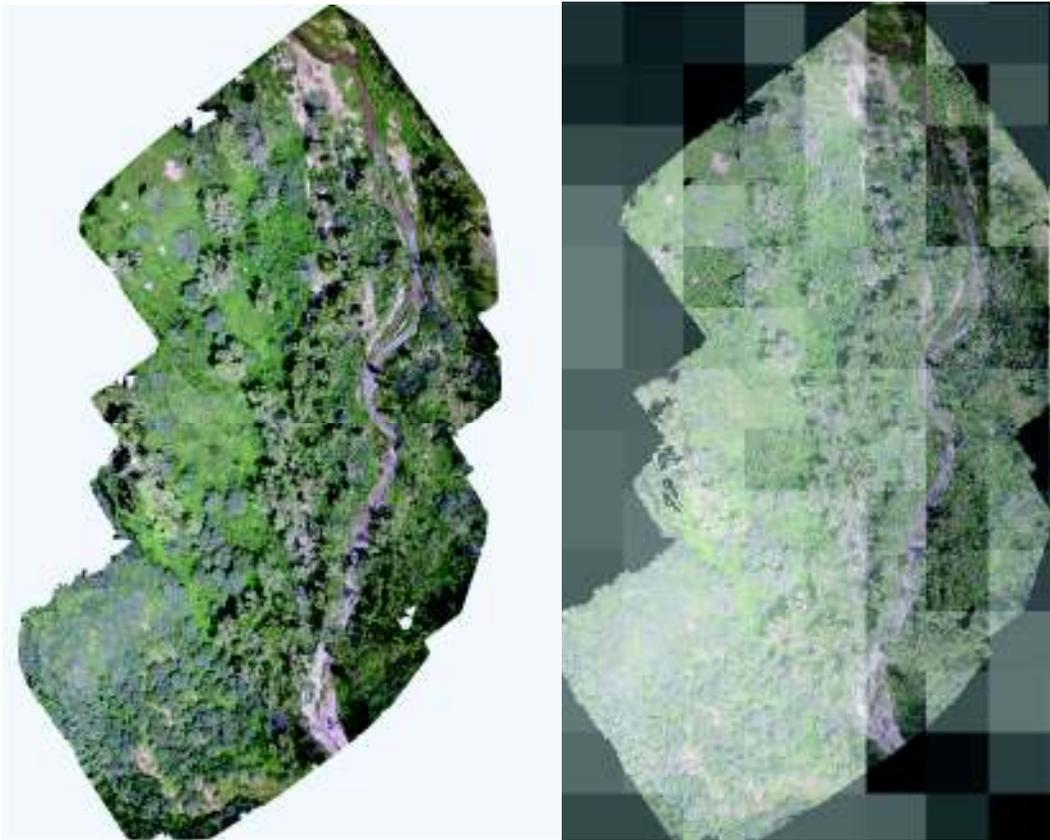


Figura 4. A la izquierda: ortomosaico que muestra una sección de río en el sitio La Galera. A la derecha: sobre-posición del ortomosaico sobre la escena Landsat. Los cuadros son los pixeles de Landsat.

Con base en lo observado en la cuadrícula se seleccionan los pixeles útiles para la digitalización de las coberturas, éstos serán los que cubran el 90% de la imagen y no contengan errores como deformaciones o huecos (lo cual es una falla normal dentro del proceso fotogramétrico que produce el ortomosaico). Por lo anterior, el área final digitalizada es menor al área total del ortomosaico.

A partir de la cuadrícula se calcula la cobertura de cada tipo de vegetación para cada pixel de la imagen satelital, por medio de digitalización directa, esto se hace delineando cada conjunto de árboles y arbustos observados en el pixel y registrando las áreas de cada conjunto para finalmente sumarlas (Figura 5). Las clases digitalizadas (delineadas) fueron: vegetación ribereña, mezquital ribereño, matorral desértico, herbáceas y suelo desnudo.

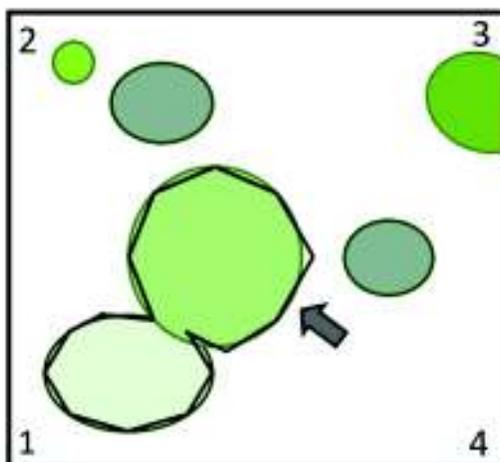


Figura 5. El cuadro representa un píxel y los círculos verdes son árboles y vegetación. La flecha es el mouse y el perímetro de líneas negras representa la digitalización del área. Las medidas se realizaron en orden de las manecillas del reloj comenzando por la esquina inferior izquierda.

IV.8. Análisis de variables y actividad fotosintética en vegetación de río y adyacente

IV.8.1. Coberturas

Para las coberturas obtenidas en campo por el método de *relevé*: con el fin de analizar las diferencias entre las coberturas de Vegetación Ribereña y Matorral Desértico de los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo, se promediaron las coberturas de cada stand para así tener un solo valor de cobertura para cada estrato, por sitio y por tipo de vegetación. Posteriormente se realizó una prueba de t de Student (para dos muestras independientes, con un alpha de 0.050) entre los valores de cobertura arbórea de todos los sitios para ambos tipos de vegetación, otra prueba de t para los valores de cobertura arbustiva y otra prueba de t para los valores de cobertura herbácea.

Para las coberturas obtenidas mediante imágenes aéreas: con el fin de analizar la variación entre las coberturas de los diferentes tipos de vegetación (Vegetación Ribereña, Mezquital Ribereño, Matorral Desértico y Herbáceas) y determinar si existen diferencias entre los sitios de estudio, se procedió a: sumar las áreas digitalizadas de los ortomosaicos para cada sitio para obtener un área total, obtener la cobertura total de cada tipo de vegetación, y

finalmente convertir las coberturas a porcentajes. Se aplicó un análisis de varianza de una vía a los porcentajes de cobertura de cada tipo de vegetación para todos los sitios en conjunto.

Para determinar si la perturbación tiene una influencia sobre las coberturas de la vegetación en los sitios ribereños, se procedió a analizar la correlación entre los porcentajes de cobertura de vegetación ribereña y los valores del índice de perturbación, así como entre los porcentajes de cobertura de mezquital ribereño y los valores del índice de perturbación.

IV.8.2. Actividad fotosintética estacional

Para analizar las diferencias entre la actividad fotosintética de los sitios ribereños y los sitios de matorral desértico se decidió analizar el índice de la vegetación (EVI) de forma estacional, de esta manera se puede tener una idea más clara sobre la magnitud de los cambios entre la actividad fotosintética antes de lluvias y después de lluvias para ambos tipos de vegetación (ribereña y adyacente). Para lo anterior, se utilizaron los valores de EVI correspondientes a aquellos pixeles con más de 400 m² de cobertura por cada tipo de vegetación (Vegetación Ribereña, Mezquital Ribereño, Matorral Desértico y Herbáceas). Se realizó dicha selección de pixeles porque se considera que la señal de actividad fotosintética proviene del tipo de vegetación de interés, siempre y cuando este tipo de vegetación tenga una representatividad dominante en cada pixel. Es decir, si en un pixel de 900 m² tenemos más de 400 m² que corresponden a Vegetación Ribereña, entonces podemos asumir que la mayoría de la señal fotosintética está dada por ese tipo de vegetación.

En este análisis se utilizaron los datos acumulados de ambos ortomosaicos por cada sitio. A partir de los valores de EVI para cada pixel, obtenidos para antes de lluvias y después de lluvias, derivados de las imágenes satelitales, se obtuvieron los residuales de ambas temporadas (septiembre menos mayo), para cada tipo de vegetación y en cada sitio.

Con la intención de comparar la variación de la actividad fotosintética durante la temporada seca y la temporada de lluvias entre los diferentes tipos de vegetación presentes en cada sitio, se procedió a aplicar una prueba de Kruskal-Wallis a los residuales. Se utilizaron los residuales de manera que sea más sencilla la visualización de la variación estacional de la actividad fotosintética entre los sitios. De esta manera los sitios con valores mayores (es decir,

un residual mayor) serían los que presenten más variación en su actividad fotosintética, y los sitios con valores menores (residual menor) serían los sitios con menor variación.

IV.8.3. Actividad fotosintética en sitios con vegetación ribereña y mezquital ribereño

Para definir si existen diferencias entre la actividad fotosintética de dos tipos de vegetación que se desarrollan al margen del río (Vegetación Ribereña y Mezquital Ribereño), se procedió a localizar los sitios con presencia de dicha asociación vegetal. Para ambos tipos de vegetación se seleccionaron los píxeles con más de 400 m² de cobertura y se utilizaron los valores del índice de la vegetación EVI correspondientes a dichos píxeles. Para cada sitio se hicieron dos pruebas Mann-Whitney utilizando los valores de EVI para cada tipo de vegetación. Una prueba corresponde a los valores para temporada seca (mayor) y otra prueba corresponde a los valores para temporada de lluvias (septiembre).

IV.8.4. Actividad fotosintética y perturbación

La actividad fotosintética, representada por índices de la vegetación, se relaciona con varios parámetros importantes del ecosistema y de la vegetación, tales como biomasa, productividad primaria y captura de carbono (Box *et al.*, 1989; Gurevitch *et al.*, 2006). Nuestro índice de perturbación pretende lograr una aproximación directa, para evaluar el estado de modificación de los sitios de estudio. La presente prueba se realizó bajo la premisa de que la perturbación y la actividad fotosintética, sostienen una relación inversa en los sitios estudiados. Aunque, independientemente de lo anterior, se considera que es necesario saber cómo se comporta la actividad fotosintética en relación con la perturbación.

Debido a que el índice de perturbación fue derivado y aplicado con la finalidad de evaluar la condición de los sitios ribereños, para el presente análisis se tomaron en cuenta solamente los valores de actividad fotosintética para los tipos de vegetación que se desarrollan en el margen del río: vegetación ribereña (en 6 de los sitios) y mezquital ribereño (para los dos sitios más perturbados).

Para establecer si existe o no una relación entre los valores de actividad fotosintética de la vegetación y los valores del índice de perturbación se realizó un análisis de regresión lineal entre los promedios de EVI para septiembre (ya que es la temporada de crecimiento y de mayor actividad fotosintética) y los datos obtenidos mediante el índice de perturbación (tomando en cuenta los valores de EVI como variable dependiente y la perturbación como variable independiente).

V. RESULTADOS

V.1. Índice de perturbación

Se siguieron los criterios del índice generado para determinar la perturbación de los sitios de estudio. Se encontró que los sitios al sur de la cuenca tienen el mayor grado de perturbación, los sitios al norte tienen un grado intermedio y los sitios en el centro-norte y centro-sur tienen un grado bajo-medio.

Los sitios localizados al sur (El Cajón y Nogalera) pertenecen al municipio de San Miguel de Horcasitas y tienen un grado de perturbación medio-alto, son los más cercanos a la ciudad de Hermosillo y tienen en común la presencia de actividades humanas intensivas en sus alrededores y la ausencia de especies ribereñas-obligadas. En ambos sitios destaca la presencia de zacate buffel muy cerca del cauce del río. También es relevante que El Cajón es el único sitio en donde se presentaron actividades recreativas, las cuales, junto con otras actividades contribuyen al estado de perturbación del sitio. El sitio Nogalera fue el único sitio en donde no se observó corriente de agua superficial, también fue el único sitio donde se observó agricultura comercial (nogal).

Los sitios localizados al norte (La Ciénega y Cercos vivos) pertenecen al municipio de Cucurpe y tienen un grado de perturbación intermedio, ambos se encuentran a una distancia de aproximadamente 10 km del poblado más cercano (la localidad de Cucurpe) y tienen en común la presencia de ganado. En el sitio Cercos vivos se encontraron cercos hechos de sauces y álamos contruidos en diferentes secciones del río, estos cercos son parte de las técnicas agrícolas tradicionales utilizadas en la región. En ambos sitios fue muy evidente la presencia de ganado en el río y sus alrededores, particularmente en las secciones fangosas de la Ciénega se podían observar huellas de ganado por todos lados.

Los sitios localizados en la parte centro-norte (Rancho San Juan y Rancho Tomás) pertenecen al municipio de Opodepe y tienen un grado de perturbación bajo-medio. Se caracterizan por ser ranchos, lo cual implica cierto manejo, construcciones, caminos y pastoreo de ganado. En el Rancho Tomás se encontró una cobertura considerable de zacate buffel en el sitio donde se muestreó el matorral a una distancia de aproximadamente 200

metros del río. En el mismo sitio se pudo apreciar una densa cobertura de mezquites junto al río y una vegetación ribereña más dispersa en comparación con los mezquites, también cerca del río se observaron amplios espacios o campos (tal vez milpas sin siembra) casi completamente desprovistos de arbustos y árboles en donde dominaban las herbáceas.

Los sitios localizados en la parte centro-sur (La Galera y Rancho Aguilar) pertenecen al municipio de Rayón y tienen en común la presencia de ganado y actividad agrícola de subsistencia. En el sitio La Galera se encontraron milpas sin siembra muy cerca del río (a menos de 100 metros de distancia), el muestreo de vegetación ribereña se realizó en un sitio en donde la cobertura de la vegetación era muy densa y muchas veces rebasaba 1 metro de altura, la composición a simple vista parecía ser más diversa que en los sitios visitados anteriormente. En el Rancho Aguilar destacó la presencia de especies leñosas trepadoras sobre los árboles ribereños. Ambos sitios presentan manejo de recursos de manera activa, ya sea por la presencia de milpas, potreros, caballos y ganado, así como por la evidencia de la utilización de maquinaria agrícola, como tractores.

La Tabla 10 muestra la aplicación de criterios por sitio y el valor del índice de perturbación resultante (IPb), la Figura 6 ilustra la localización de los sitios a lo largo de la subcuenca.

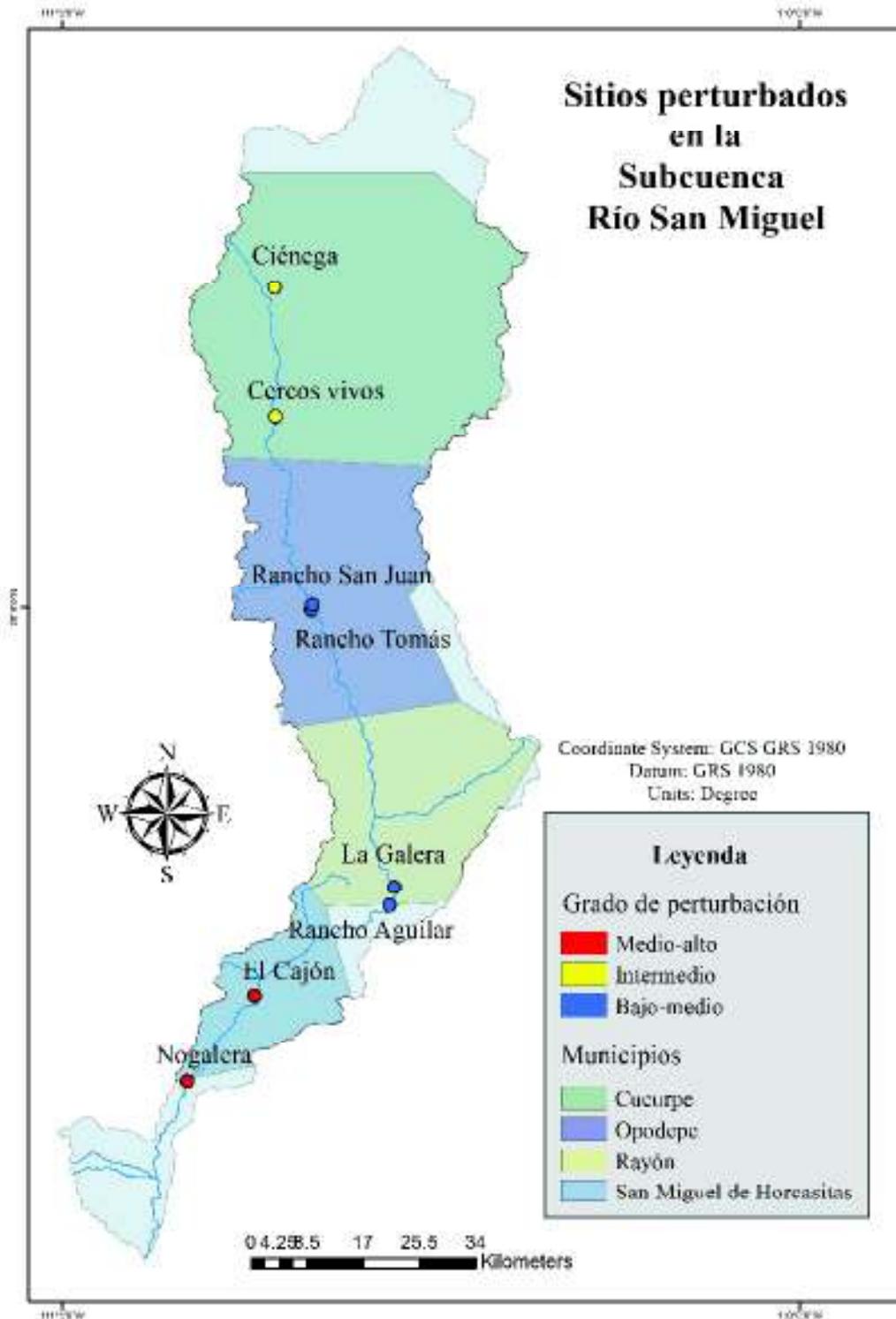


Figura 6. Localización de los sitios de estudio y grado de perturbación

Tabla 10. Aplicación de criterios por sitio y grado de perturbación resultante. Sitios: RA (Rancho Aguilar), C (Ciénega), CV (Cercos Vivos), EC (El Cajón), N (Nogalera), LG (La Galera), RS (Rancho San Juan), RT (Rancho Tomás). Grado de perturbación: B-M (Bajo-Medio), I (Intermedio), M-A (Medio-Alto).

Sitios	Corriente superficial			Presencia de <i>Populus</i> y/ <i>Salix</i>			Presencia o evidencia de ganado			Agricultura			Caminos y asentamientos humanos			Actividad recreativa			IP b	Grado de perturbación
	Si	Poco	No	Si	Poco	No	Si	Poco	No	Si	Poco	No	Si	Poco	No	Si	Poco	No		
RA	X			X				X			X					X		X	11	B-M
C		X			X							X							12	I
CV	X			X							X								12	I
EC	X					X		X			X					X			16	M-A
N						X			X									X	15	M-A
LG	X			X					X							X			11	B-M
RS	X			X									X						10	B-M
RT	X			X									X						10	B-M

V.2. Muestreo de la vegetación en campo – Estructura, cobertura, composición y diversidad

Para el muestreo en *vegetación ribereña*, el cual cubre un área de 2700m² por sitio, destaca que el **estrato herbáceo** mantiene una cobertura superior al 50% en todos los sitios, esto es comprensible debido a que los muestreos se realizaron durante la temporada de crecimiento, y es en esta época cuando muchas especies de hierbas anuales (que no están presentes el resto del año) desarrollan gran parte de su ciclo de vida. En la Figura 7 se puede observar que el sitio con mayor cobertura de herbáceas fue la Ciénega (91%), lo cual resulta interesante ya que en este sitio se observó ganado en toda el área ribereña, lo que normalmente tiene un efecto negativo sobre el estrato herbáceo. El sitio con menor cobertura de herbáceas fue el Rancho San Juan (47%).

En cuanto al **estrato arbustivo** se puede observar que los valores de cobertura son muy variables y en tres de los ocho sitios el porcentaje es muy bajo. En la Figura 7 se puede observar que el sitio con mayor cobertura de arbustos es el Rancho Tomás (75%) y el sitio con menor cobertura de arbustos es el Rancho Aguilar (3.6%). Los tres sitios con menor cobertura de arbustos tienen en común la presencia de ganado en la zona ribereña, aunque en diferentes intensidades (según lo observado en campo).

El **estrato arbóreo** supera el 30% de cobertura en todos los sitios, indicando que existe cierta estabilidad en la permanencia del dosel arbóreo, lo cual es importante ya que éste estrato permite que se mantengan las condiciones del hábitat ribereño. Sin embargo, en términos de composición, la cobertura arbórea no necesariamente corresponde a especies ribereñas obligadas. En la Figura 7 se puede observar que la Ciénega es el sitio con mayor cobertura arbórea (86%), este sitio se caracteriza por su poca representatividad de especies de sauces o álamos, sin embargo, destaca la dominancia de otra especie ribereña menos común: *Fraxinus velutina*. El Rancho Tomás es el sitio con menor cobertura arbórea (23%).

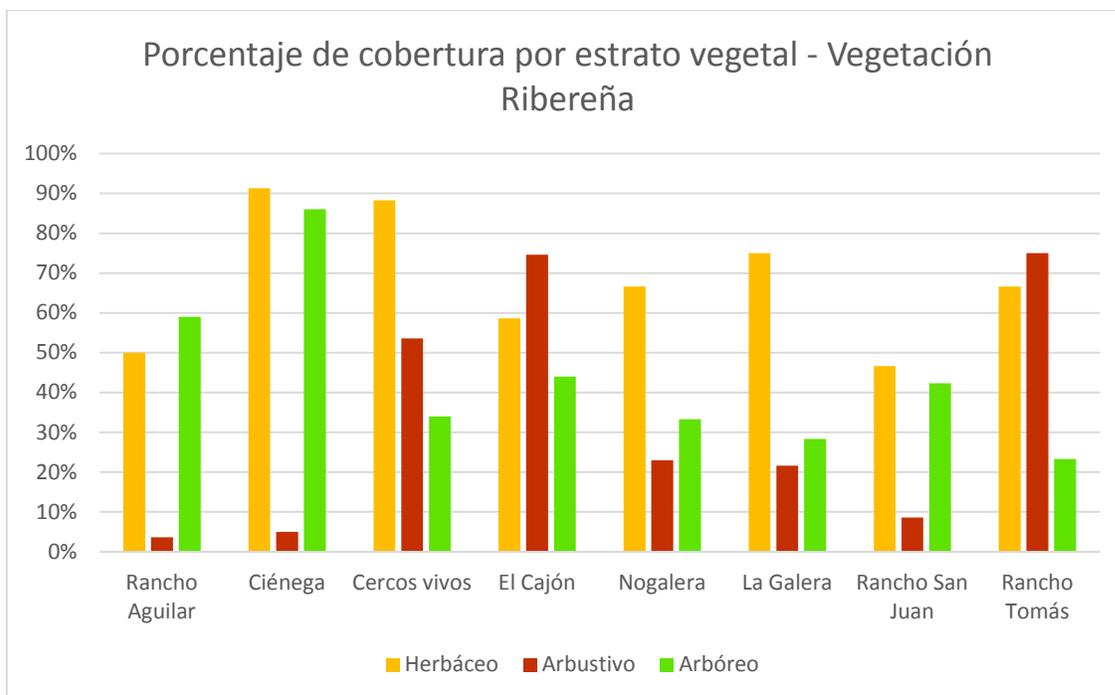


Figura 7. Coberturas por estrato para la vegetación ribereña en cada sitio

En cuanto a composición (Tabla 11), los sitios Rancho Aguilar, Ciénega, Cercos Vivos, La Galera, Rancho San Juan y Rancho Tomás presentaron dominancia (mayor número de individuos) de especies ribereñas-obligadas arbóreas como *Populus fremontii*, *Fraxinus velutina* y *Salix gooddingii*, los sitios restantes (El Cajón y Nogalera) estuvieron dominados por especies ribereñas-facultativas o no-ribereñas, principalmente por las leguminosas *Prosopis velutina* y *Parkinsonia florida*, características de ecosistemas desérticos.

El estrato arbustivo se destaca por que en la mitad de los sitios dominan algunas especies exóticas/naturalizadas e indicadoras de disturbio como *Ricinus communis* y *Nicotiana glauca*. Es importante mencionar, que, aunque en baja frecuencia, se detectó la presencia de zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*), en los sitios El Cajón y Nogalera.

Otra observación importante en cuanto a la composición en el sitio Nogalera es la presencia de especies de cactáceas (*Cylindropuntia leptocaulis* y *Lophocereus schottii*) cerca del cauce del río.

Tabla 11. Especies dominantes del estrato arbustivo (Arbu) y arbóreo (Arbo) en vegetación ribereña.

	Rancho Aguilar	Ciénega	Cercos Vivos	El Cajón	Nogalera	La Galera	Rancho San Juan	Rancho Tomás
Arbu	<i>Ricinus communis</i> <i>Baccharis salicifolia</i>	<i>Celtis pallida</i>	<i>Baccharis salicifolia</i> <i>Nicotiana glauca</i>	<i>Celtis pallida</i> <i>Vallesia glabra</i>	<i>Lycium berlandieri</i>	<i>Ricinus communis</i> <i>Nicotiana glauca</i> <i>Ambrosia ambrosioides</i>	<i>Nicotiana glauca</i> <i>Baccharis salicifolia</i> <i>Ricinus communis</i>	<i>Baccharis salicifolia</i>
Arbo	<i>Populus fremontii</i> <i>Prosopis velutina</i> <i>Acacia farnesiana</i>	<i>Fraxinus velutina</i>	<i>Salix gooddingii</i>	<i>Prosopis velutina</i>	<i>Parkinsonia florida</i> <i>Prosopis velutina</i>	<i>Populus fremontii</i> <i>Parkinsonia aculeata</i>	<i>Salix gooddingii</i>	<i>Salix gooddingii</i>

Para el muestreo en *matorral desértico*, el cual cubre un área de 2700m² por cada sitio, se registró una amplia variación en las coberturas de los tres estratos vegetales.

El **estrato herbáceo** (Figura 8) registra una variación considerable entre todos los sitios encontrando coberturas desde 97% (Nogalera) hasta el 12% (Cercos vivos); las características geográficas entre estos dos sitios difieren, ya que en la Nogalera el sitio de muestreo era plano y se encontraba casi a la misma altitud del cauce del río, por otro lado, en Cercos vivos el sitio de muestreo se encontraba en una colina rocosa. Coinciden La Galera y el Rancho Aguilar en tener el mismo porcentaje de cobertura herbácea (50%), ambos sitios se encuentran localizados dentro del mismo municipio y cercanos entre sí. Es notable que, a pesar de que el muestreo se llevó a cabo durante la temporada de crecimiento, la cobertura herbácea no alcanza más del 50% en la mayoría de los sitios (con excepción de la Nogalera).

Para el **estrato arbustivo** (Figura 8), se puede observar que los sitios con menor cobertura son Nogalera (3.6%) y Ciénega (7.3%), en ambos sitios había amplios espacios abiertos de suelo desnudo. Los sitios con mayor cobertura arbustiva fueron El Cajón (56.6%) y el Rancho Aguilar (53.3%), en el primero, el muestreo se realizó en una loma rocosa y, en el segundo, el muestreo se realizó en un sitio junto a una milpa, en donde se notaba que la composición de la vegetación tenía más influencia de mezquital.

En el caso del **estrato arbóreo** (Figura 8), La Ciénega es el sitio con mayor cobertura (63.3%), este sitio de muestreo se encontraba en una planicie rocosa que aumentaba en

elevación gradualmente, sin ser muy escarpada; por el contrario, el sitio de muestreo para Cercos Vivos (cuya cobertura arbórea fue de 7.3%) era una colina rocosa más escarpada y de difícil acceso por su inclinación.

Se observa también que La Galera es el único sitio en donde las coberturas del estrato herbáceo, arbustivo y arbóreo son similares (50%, 37% y 40%, respectivamente); a su vez, la Nogalera es la que presenta mayor variación dentro de sus coberturas.

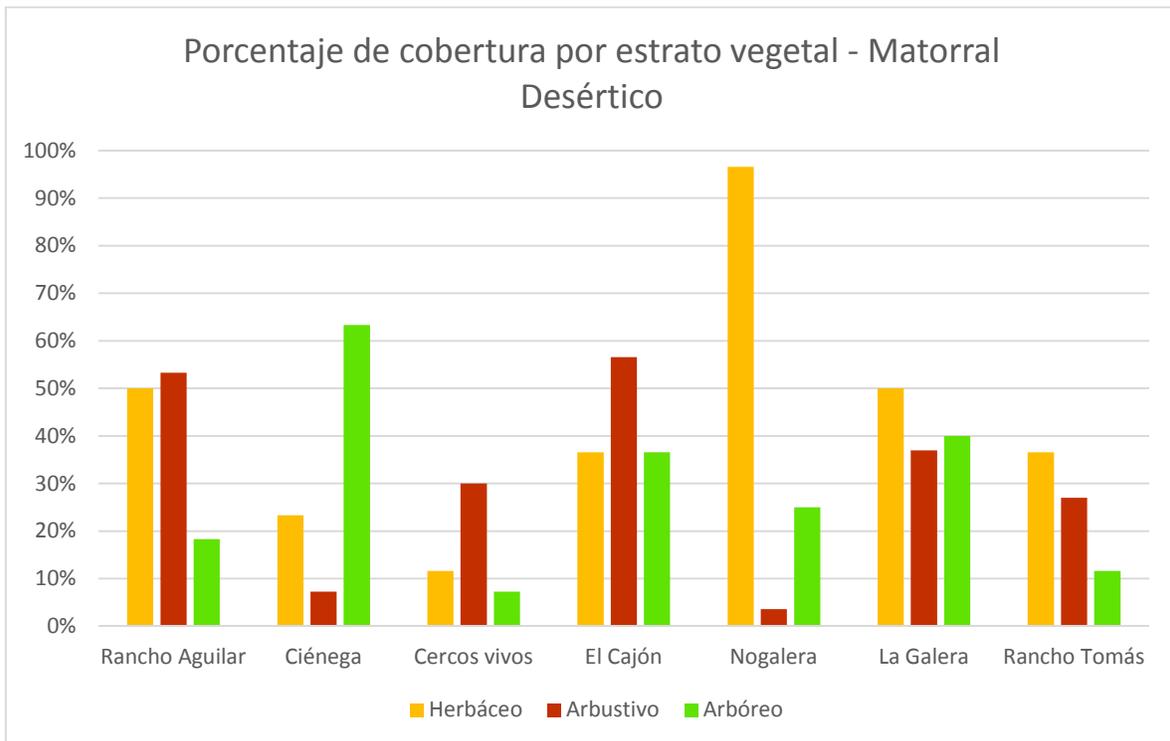


Figura 8. Coberturas por estrato para el matorral desértico en cada sitio

La composición de los estratos arbustivo y arbóreo (Tabla 12) en el matorral desértico está representada por dominancia (mayor número de individuos) de especies características de dicho ecosistema.

Tabla 12. Especies dominantes del estrato arbustivo (Arbu) y arbóreo (Arbo) en matorral desértico

	Rancho Aguilar	Ciénega	Cercos Vivos	El Cajón	Nogalera	La Galera	Rancho Tomás
Arbu	<i>Celtis pallida</i>	<i>Lycium berlandieri</i> <i>Celtis pallida</i>	<i>Mimosa laxiflora</i>	<i>Mimosa laxiflora</i>	<i>Jathropha cardiophylla</i>	<i>Celtis pallida</i>	<i>Celtis pallida</i>
Arbo	<i>Prosopis velutina</i>	<i>Prosopis velutina</i>	<i>Prosopis velutina</i>	<i>Stenocereus thurberi</i> <i>Olneya tesota</i>	<i>Olneya tesota</i> <i>Parkinsonia florida</i>	<i>Prosopis velutina</i>	<i>Prosopis velutina</i>

El análisis estadístico no mostró diferencias significativas entre las coberturas del estrato arbustivo y arbóreo para la vegetación ribereña y el matorral desértico, entre sitios.

En cuanto a diversidad (calculada para árboles y arbustos) (Tabla 13), se encontró que en 5 sitios el valor del índice Shannon-Wiener calculado para el estrato arbustivo y arbóreo es mayor en matorral desértico que en vegetación ribereña. Los sitios en donde la vegetación ribereña presentó mayor diversidad fueron Cercos Vivos y La Galera, los sitios en donde la vegetación ribereña presentó menor diversidad fueron Ciénega y Rancho Tomás.

El índice de equitatividad de Shannon coincide con el índice de diversidad Shannon-Wiener, indicando que, en los sitios en donde los valores de ambos índices son mayores, las especies se encuentran distribuidas de manera uniforme y son muy pocas las especies que presentan dominancia (índice Simpson) o gran número de individuos. De igual manera, en los sitios en donde la diversidad es baja, la equitatividad también lo será, y la dominancia será mayor. Un ejemplo de lo anterior es el caso del sitio Ciénega, en donde la diversidad para la vegetación ribereña es de 0.49 y la dominancia de 0.75, en dicho sitio hubo una dominancia de la especie *Fraxinus velutina* (276 individuos), mostrando una enorme diferencia con la otra especie arbórea presente *Salix gooddingii* (5 individuos).

Los datos para vegetación ribereña muestran mayor variación (desv. est. 0.583) que los de matorral desértico (desv. est. 0.403).

Tabla 13. Índices de diversidad, dominancia y equitatividad para estrato arbustivo y arbóreo

	Índice Shannon-Wiener		Índice Simpson		Índice Equitatividad Shannon	
	Vegetación Ribereña	Matorral Desértico	Vegetación Ribereña	Matorral Desértico	Vegetación Ribereña	Matorral Desértico
Rancho Aguilar	1.5821	1.6510	0.2659	0.2861	0.7609	0.6885
Ciénega	0.4957	1.1365	0.7557	0.5095	0.3576	0.5172
Cercos Vivos	1.8725	1.82230	0.1970	0.2072	0.7301	0.7602
El Cajón	1.8535	1.7179	0.1906	0.2030	0.7730	0.8828
Nogalera	1.3557	1.9141	0.6043	0.2292	0.5456	0.7531
La Galera	1.9389	0.9598	0.8131	0.4664	0.8086	0.4932
Rancho San Juan	1.8029		0.7718		0.7519	
Rancho Tomás	0.5909	1.0350	0.3534	0.5153	0.5378	0.4977

V.3. Coberturas derivadas de imágenes aéreas

Se obtuvieron en total 15 ortomosaicos derivados de las imágenes obtenidas en campo mediante los vuelos con la Plataforma Aérea No Tripulada Inspire 1, de los cuales, 8 corresponden a vegetación ribereña y 7 a matorral desértico. Se identificaron 4 clases de cobertura o tipos de vegetación: Vegetación Ribereña, Mezquital Ribereño, Matorral Desértico, Herbáceas. La clase de Herbáceas se manejó aparte debido a que se quiso diferenciar entre la señal de productividad proveniente de los píxeles dominados por vegetación ribereña y los píxeles en los que la cobertura herbácea dominaba.

En el caso de los sitios El Cajón y Nogalera se utilizó el mismo ortomosaico para medir las coberturas de los tipos de vegetación, ya que el área del ortomosaico cubrió secciones representativas para cada clase.

En las Tablas 14 y 15 se muestran los valores de coberturas obtenidos mediante la digitalización los ortomosaicos de río y de matorral, respectivamente, y representan el porcentaje de cada tipo de vegetación por el total del área digitalizada por sitio. En las Figuras 9 y 10 se muestra la distribución de coberturas para cada tipo de vegetación por sitio, para ortomosaicos de río y de matorral, respectivamente.

Tabla 14. Porcentaje de cobertura por tipo de vegetación para cada sitio, ortomosaicos río. La superficie total representa el área digitalizada.

	Rancho Aguilar	Ciénega	Cercos Vivos	El Cajón	Nogalera	La Galera	Rancho San Juan	Rancho Tomás
Vegetación Ribereña	19.73%	47.29%	27.69%			25.93%	30.74%	55.36%
Mezquital Ribereño	17.95%	14.48%	11.52%	58.05%	39.8%	16.35%	16.36%	13.95%
Matorral Desértico		6.41%	3.55%	6.58%	10.95%			
Herbáceas	16.47%	25.32%	41%	18.19%	34.86%	47.54%	36.15%	25.88%
Superficie total (m²)	56,700	37,800	36,000	57,600	63,000	49,500	37,800	27,000

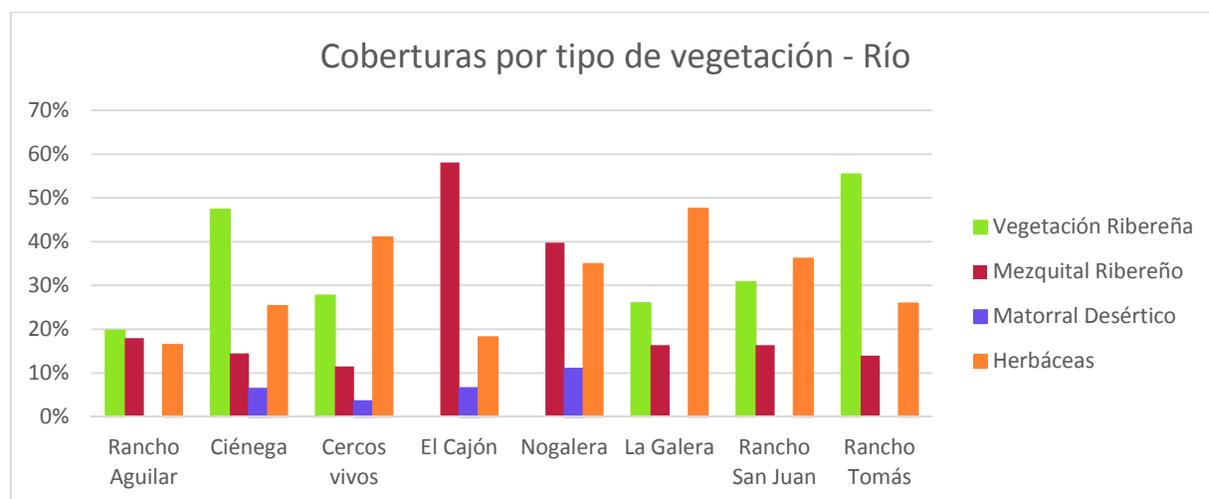


Figura 9. Cobertura de los tipos de vegetación en cada sitio, ortomosaicos río

Tabla 15. Porcentaje de cobertura por tipo de vegetación para cada sitio, ortomosaicos matorral. La superficie total representa el área digitalizada.

	Rancho Aguilar	Ciénega	Cercos Vivos	El Cajón	Nogalera	La Galera	Rancho Tomás
Vegetación Ribereña		21%	1%				0.23%
Mezquital Ribereño	24.85%	29.7%	24.18%	58%	39.8%	54.53%	20.87%
Matorral Desértico	19%	10%	49.73%	6.58%	10.95%	10.81%	44.22%
Herbáceas	2.96%	28.29%	15.28%	18.19%	34.86%	15.66%	21.53%
Superficie total (m²)	42,300	34,200	27,900	57,600	63,000	23,400	31,500

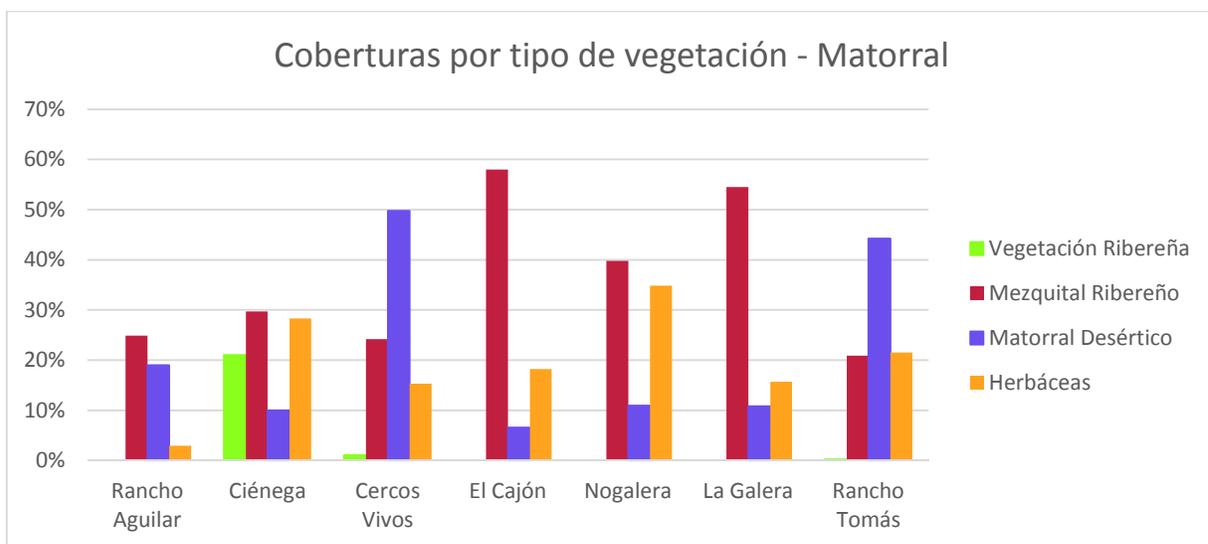


Figura 10. Cobertura de los tipos de vegetación en cada sitio, ortomosaicos matorral

El análisis estadístico no mostró diferencias significativas entre las coberturas de Vegetación Ribereña, Mezquital Ribereño, Matorral Desértico y Herbáceas, entre todos los sitios.

V.4. Cobertura de la vegetación y perturbación

Los análisis realizados entre las coberturas de vegetación ribereña y mezquital ribereño de los ortomosaicos de río y el índice de perturbación muestran una correlación significativa,

indicando que el tipo de vegetación presente en un sitio puede explicar o representar el grado de perturbación.

En el caso de la comparación entre vegetación ribereña y el índice de perturbación, la Figura 11 muestra una relación negativa entre las dos variables en cuanto a que la cobertura de la vegetación ribereña disminuye conforme aumenta la perturbación.

Perturbación y cobertura de vegetación ribereña

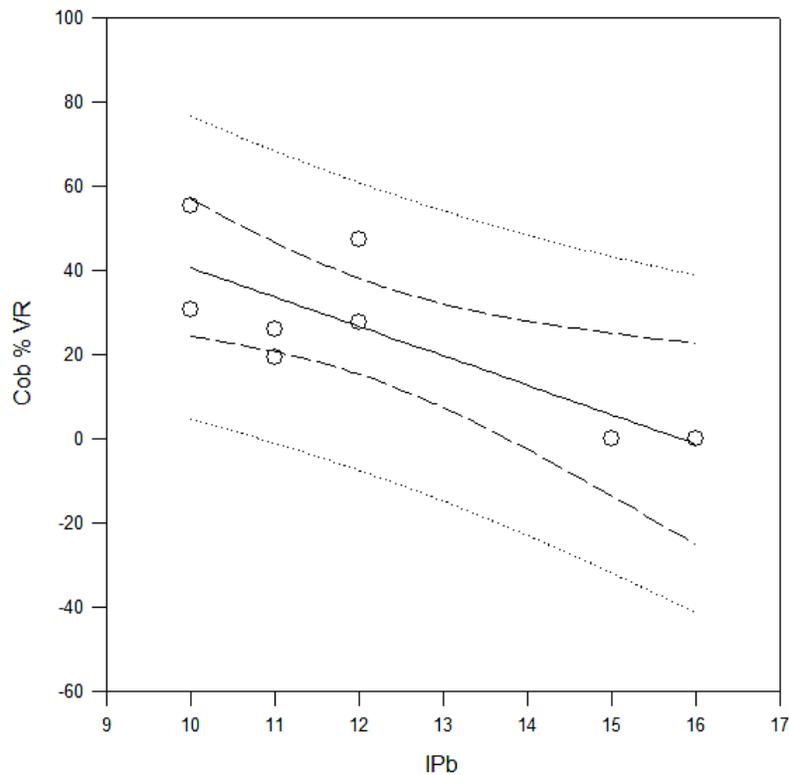


Figura 11. Regresión lineal entre porcentaje de cobertura de vegetación ribereña (Cob % VR) e índice de perturbación (IPb) ($\alpha=0.050$, $r^2=0.620$).

En el caso de la comparación entre mezquital ribereño y el índice de perturbación, la Figura 12 muestra una relación positiva entre las dos variables en cuanto a que la cobertura de mezquital ribereño aumenta conforme aumenta la perturbación.

Perturbación y cobertura de mezquital ribereño

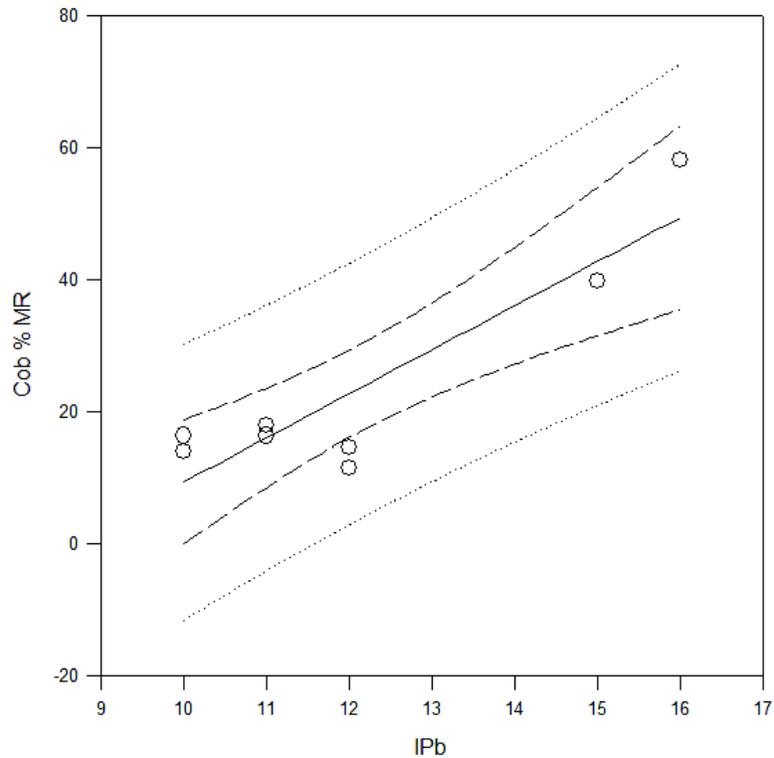


Figura 12. Regresión lineal entre porcentaje de cobertura de mezquital ribereño (Cob % MR) e índice de perturbación (IPb) ($\alpha=0.050$, $r^2=0.817$).

Las Figuras anteriores (11 y 12) representan de manera clara cómo la cobertura de la vegetación puede ayudar a definir el grado de perturbación, sobre todo, se observa cómo los dos sitios más perturbados son los que dirigen la tendencia de la recta en la gráfica, ya que al no presentar vegetación ribereña obligada se les ha clasificado como los más perturbados. Sin embargo, es importante mencionar que la cobertura de la vegetación no es el único parámetro utilizado para determinar el grado de perturbación, por lo que no se debe deducir de las gráficas anteriores, que la sola presencia de mezquital ribereño equivale a perturbación.

V.5. Índices de vegetación derivados de imágenes satelitales

Se obtuvieron los valores del índice mejorado de la vegetación (EVI, por sus siglas en inglés) para los ortomosaicos de río y para los de matorral desértico. La Figura 13 muestra el gradiente de actividad fotosintética en el área de estudio. Utilizando las imágenes de Landsat OLI/TIRS previamente descritas, se derivó el índice de la vegetación para toda la subcuenca del río San Miguel.

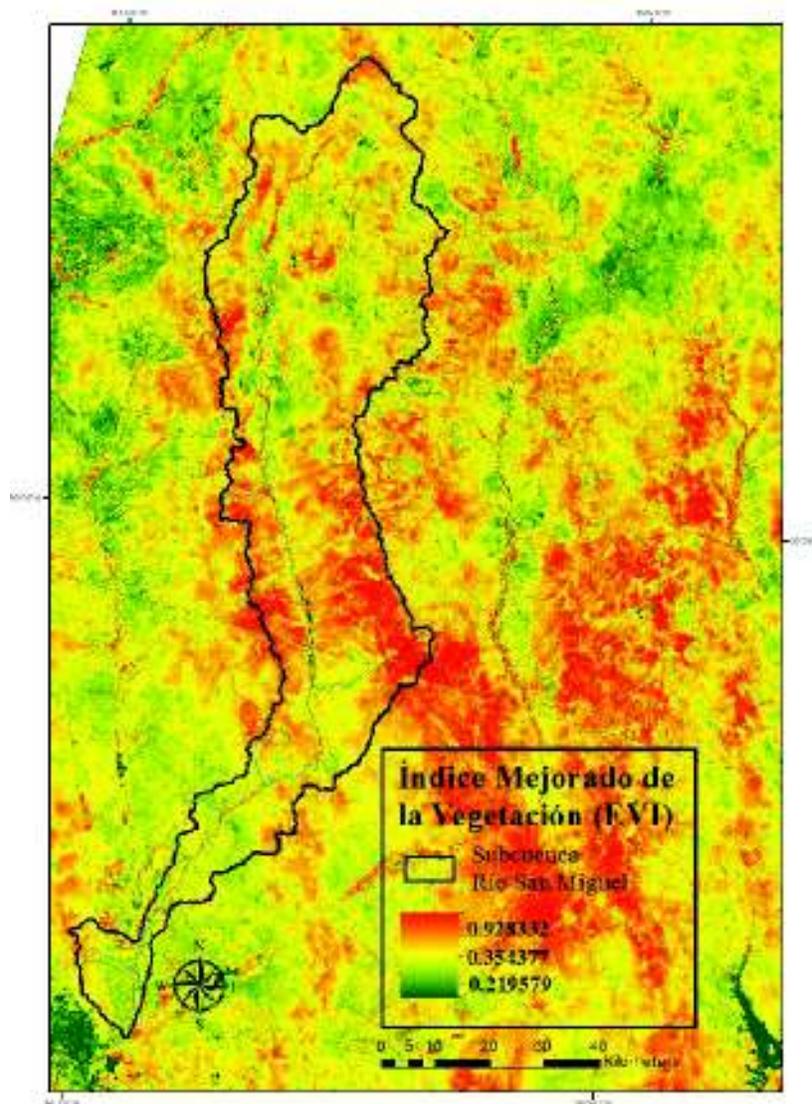


Figura 13. Compuesto de EVI para ambas escenas tomadas para septiembre de 2016. Gradiente de actividad fotosintética representado por el índice mejorado de la vegetación. Los sitios en rojo (con valores más cercanos a 1) son los de mayor actividad fotosintética, mientras los sitios en verde (con valores más cercanos a cero) son los de menor actividad.

V.5.1. Mosaicos de río

Como se puede observar en la Tabla 16, la vegetación ribereña en la mayoría de los sitios presenta valores de EVI mayores durante la temporada de crecimiento (septiembre). Únicamente el sitio Ciénega presenta un valor ligeramente mayor para mayo que para septiembre, este sitio también presenta el valor más alto de EVI para septiembre, lo anterior coincide con el hecho de que en el sitio Ciénega hay una humedad constante durante todo el año. El sitio en donde la vegetación ribereña tuvo menor actividad fotosintética durante la temporada de crecimiento fue Cercos vivos.

En la mayoría de los sitios se puede observar que el mezquital ribereño varía de manera importante entre temporadas. También, para la mayoría de los sitios se observa que la vegetación ribereña presenta valores mayores que el mezquital ribereño, durante la temporada seca, y en la mitad de los sitios los valores de vegetación ribereña son mayores que los de mezquital ribereño para la temporada de crecimiento. En la Tabla 16 se puede observar que la vegetación ribereña mantiene cierta estabilidad en actividad fotosintética durante ambas temporadas y que la mayoría de las veces supera a la actividad fotosintética del mezquital ribereño.

Tabla 16. Promedio de EVI calculado a partir de los pixeles con más de 50% de cobertura para cada tipo de vegetación, ortomosaicos de río.

	EVI - Mayo 2016			EVI - Septiembre 2016		
	Vegetación Ribereña	Mezquital Ribereño	Hierbas	Vegetación Ribereña	Mezquital Ribereño	Hierbas
Rancho Aguilar	0.406 (n=13)	0.382 (n=8)	0.361 (n=9)	0.434 (n=13)	0.424 (n=8)	0.434 (n=9)
Ciénega	0.569 (n=21)	0.389 (n=8)	0.541 (n=10)	0.542 (n=21)	0.434 (n=8)	0.579 (n=10)
Cercos Vivos	0.33 (n=7)	0.17 (n=2)	0.312 (n=15)	0.398 (n=7)	0.429 (n=2)	0.537 (n=15)
El Cajón	n/a	0.42 (n=37)	0.409 (n=8)	n/a	0.409 (n=37)	0.426 (n=8)
Nogalera	n/a	0.193 (n=27)	0.167 (n=20)	n/a	0.363 (n=27)	0.314 (n=20)

La Galera	0.359 (n=8)	0.406 (n=11)	0.315 (n=29)	0.493 (n=8)	0.469 (n=11)	0.463 (n=29)
Rancho San Juan	0.326 (n=12)	0.196 (n=6)	0.279 (n=16)	0.453 (n=12)	0.345 (n=6)	0.446 (n=16)
Rancho Tomás	0.384 (n=17)	0.349 (n=6)	n/a	0.399 (n=17)	0.373 (n=6)	n/a

V.5.2. Mosaicos de matorral desértico

Como se puede observar en la Tabla 17, los cambios entre los valores para ambas temporadas son muy evidentes, mostrando que la vegetación de matorral desértico y de mezquital ribereño tiene una respuesta fisiológica acelerada en cuanto la disponibilidad de agua aumenta, ya que para ambos tipos de vegetación el EVI es considerablemente mayor (en algunos casos más del doble) durante la temporada de crecimiento.

El valor más alto para mayo en matorral desértico lo presentó el sitio Rancho Tomás y el más bajo Cercos Vivos. Para septiembre el matorral desértico fue más productivo en el Rancho Aguilar y menos productivo en El Cajón.

Tabla 17. Promedio de EVI calculado a partir de los pixeles con más de 50% de cobertura para cada tipo de vegetación, ortomosaicos de matorral.

	EVI - Mayo 2016			EVI - Septiembre 2016		
	Matorral Desértico	Mezquital Ribereño	Hierbas	Matorral Desértico	Mezquital Ribereño	Hierbas
Rancho Aguilar	0.144 (n=8)	0.294 (n=13)	n/a	0.412 (n=8)	0.493 (n=13)	n/a
Ciénega	0.249 (n=5)	0.261 (n=12)	0.512 (n=9)	0.384 (n=5)	0.388 (n=12)	0.561 (n=9)
Cercos Vivos	0.137 (n=16)	0.232 (n=8)	0.301 (n=4)	0.377 (n=16)	0.423 (n=8)	0.521 (n=4)
El Cajón	0.139 (n=5)	0.42 (n=37)	0.409 (n=8)	0.318 (n=5)	0.409 (n=37)	0.426 (n=8)
Nogalera	0.167 (n=8)	0.193 (n=27)	0.167 (n=20)	0.338 (n=8)	0.363 (n=27)	0.314 (n=20)
La Galera	0.168 (n=3)	0.288 (n=18)	0.209 (n=1)	0.368 (n=3)	0.383 (n=18)	0.554 (n=1)
Rancho Tomás	0.256/ área con buffel 0.181 (n=11)	0.309 (n=8)	0.271 (n=7)	0.381/ área con buffel 0.412 (n=11)	0.366 (n=8)	0.355 (n=7)

En uno de los sitios se encontró una alta presencia de zacate buffel *Cenchrus ciliaris* en la parte de matorral desértico, el ortomosaico muestra una diferencia muy marcada en cobertura y composición de la vegetación, ya que la mitad del sitio tiene un matorral desértico con más abundancia de árboles y arbustos, y la otra mitad (en donde está sembrado el zacate buffel) tiene menor densidad de leñosas. En este sitio destaca que la mitad con buffel tiene una productividad menor que la mitad con matorral desértico durante la temporada de secas, pero durante la temporada de lluvias el área con buffel presenta mayor productividad que el matorral desértico.

En términos generales, lo que se puede observar en ambas tablas (16 y 17) es que la vegetación ribereña mantiene su actividad fotosintética relativamente estable durante ambas temporadas, debido a la disponibilidad de agua subterránea existente en el ambiente en donde se desarrolla este tipo de vegetación. Otro aspecto relevante con respecto a la vegetación ribereña es que presenta valores de actividad fotosintética mayores que los otros tipos de vegetación, para ambas temporadas. El mezquital ribereño también presenta variaciones temporales en su actividad fotosintética, sugiriendo que el mezquital depende más de la precipitación que del agua subterránea (en comparación con la vegetación ribereña-obligada). En el caso del matorral desértico se puede observar que la actividad fotosintética cambia de manera importante entre una temporada y otra, presentando los valores más altos durante la temporada de crecimiento (septiembre). La cobertura herbácea también presenta sus valores más altos durante septiembre y es la Ciénega la que presenta el valor más alto; la menor actividad fotosintética de las herbáceas se registra durante mayo en uno de los sitios más perturbados (Nogalera).

V.6. Análisis comparativos de actividad fotosintética

El análisis de estacionalidad muestra las diferencias en la actividad fotosintética de cada tipo de vegetación para cada sitio. En la mayoría de los sitios el matorral desértico presenta diferencias significativas con el resto de los tipos de vegetación. A continuación, se presentan las gráficas para cada sitio, en donde se incluye valor del estadístico de prueba para Kruskal-Wallis (H), y el nivel de significancia (P); los tipos de vegetación están representados por

iniciales: VR (vegetación ribereña), MR (mezquital ribereño), MD (matorral desértico), HE (herbáceas). El tamaño de muestra para cada tipo de vegetación está representado por N.

Para el sitio Rancho Aguilar se observan (Figura 14) diferencias significativas entre el matorral desértico y el resto de los tipos de vegetación, indicando que los valores de actividad fotosintética para el matorral desértico presentan mayor variación que cualquier otro tipo de vegetación. Los residuales del matorral desértico son mayores, es decir que hay mayor diferencia entre su actividad fotosintética estacionalmente, el mezquital ribereño es el siguiente tipo de vegetación con variación y luego sigue la vegetación ribereña y las herbáceas como los tipos de vegetación con residuales más bajos o cercanos a cero, lo cual indica que su actividad fotosintética no cambia de manera drástica estacionalmente.

Para el sitio Ciénega también se puede observar (Figura 15) que el matorral desértico tiene residuales mayores que los otros tipos de vegetación y existen diferencias significativas entre el matorral desértico y la vegetación ribereña. Existen también diferencias significativas entre el mezquital ribereño y la vegetación ribereña. También se observa que los residuales de la vegetación ribereña se encuentran por debajo de cero, lo cual indica que en algunos pixeles la actividad fotosintética de mayo fue mayor a la de septiembre.

Para el sitio Cercos Vivos (Figura 16), se observan diferencias entre el matorral desértico y la vegetación ribereña, así como entre las herbáceas y la vegetación ribereña. En este sitio la vegetación ribereña es la que presenta valores de actividad fotosintética en un rango más amplio que los demás tipos de vegetación. El matorral desértico, el mezquital ribereño y las herbáceas presentan valores residuales mayores que los de la vegetación ribereña. En este sitio la vegetación ribereña también llega a tener valores de mayores para mayo en algunos casos.

En el sitio El Cajón (Figura 17), el matorral desértico presenta diferencias significativas con respecto al mezquital ribereño y a las herbáceas. Los residuales del matorral desértico son mayores que los de los otros tipos de vegetación, indicando una respuesta fotosintética muy marcada entre temporadas. El mezquital ribereño y las herbáceas presentan valores residuales menores a cero, lo cual indica que en algunos sitios éste tipo de vegetación tiene una actividad fotosintética mayor durante mayo, o muy similar entre ambas temporadas.

Para La Nogalera (Figura 18) se observa que, aunque los tres tipos de vegetación presentan valores residuales similares, hay diferencias significativas entre el mezquital ribereño y las herbáceas. El mezquital ribereño es el tipo de vegetación con valores residuales mayores, es decir que es la vegetación con mayores diferencias estacionales.

Para La Galera (Figura 19) se observan diferencias entre el matorral desértico y el mezquital ribereño, así como entre herbáceas y mezquital ribereño. La mayoría de los residuales del matorral desértico son valores mayores que en los otros tipos de vegetación. En este sitio el mezquital ribereño es el que presenta los valores residuales más bajos, indicando que hay poca variación entre la actividad fotosintética estacional.

Para el Rancho San Juan (Figura 20) no hay diferencias significativas entre ninguno de los tipos de vegetación. En este sitio no se muestreó matorral desértico. Los valores residuales del mezquital ribereño muestran mayor estabilidad en su distribución, lo cual quiere decir que los valores de actividad fotosintética entre temporadas son similares en todos los pixeles muestreados (aunque cabe mencionar que el tamaño de muestra fue pequeño, 8).

Para el Rancho Tomás (Figura 21) se observan diferencias entre el matorral desértico con buffel y tres tipos de vegetación (vegetación ribereña, mezquital ribereño y herbáceas). En este sitio el matorral desértico (con y sin buffel), así como las herbáceas, tienen los valores residuales más altos, presentando mayor variación estacional en su actividad fotosintética que los otros tipos de vegetación. La vegetación ribereña presenta valores residuales con una amplia variación, mostrando que cada pixel de la vegetación tiene una respuesta fotosintética diferente a la de los demás tipos de vegetación, también hay valores debajo de cero, indicando que en algunos casos la actividad fotosintética es mayor para mayo que para septiembre.

Rancho Aguilar

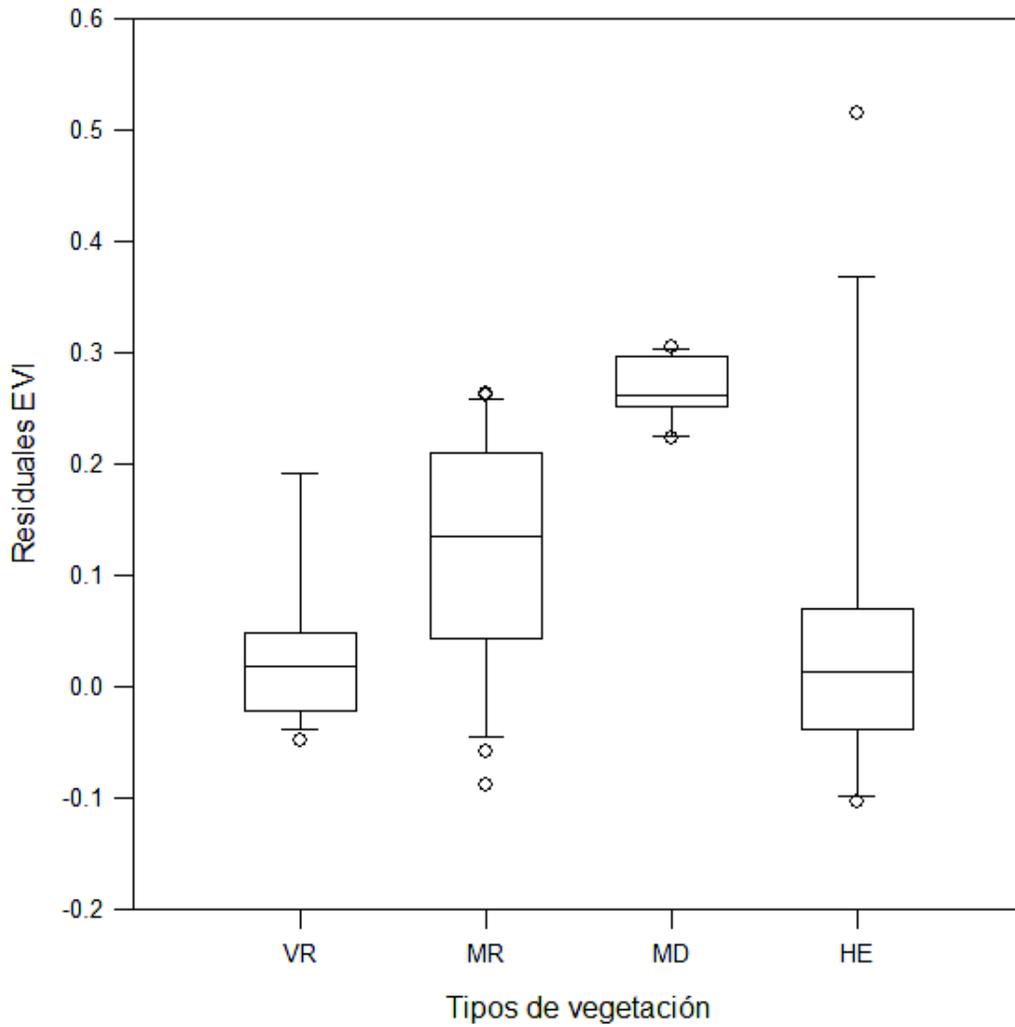


Figura 14. Rancho Aguilar ($H= 28.23$, $P= <0.001$), $N= VR(16)$ $MR(24)$ $MD(11)$ $HE(13)$.

La Ciénega

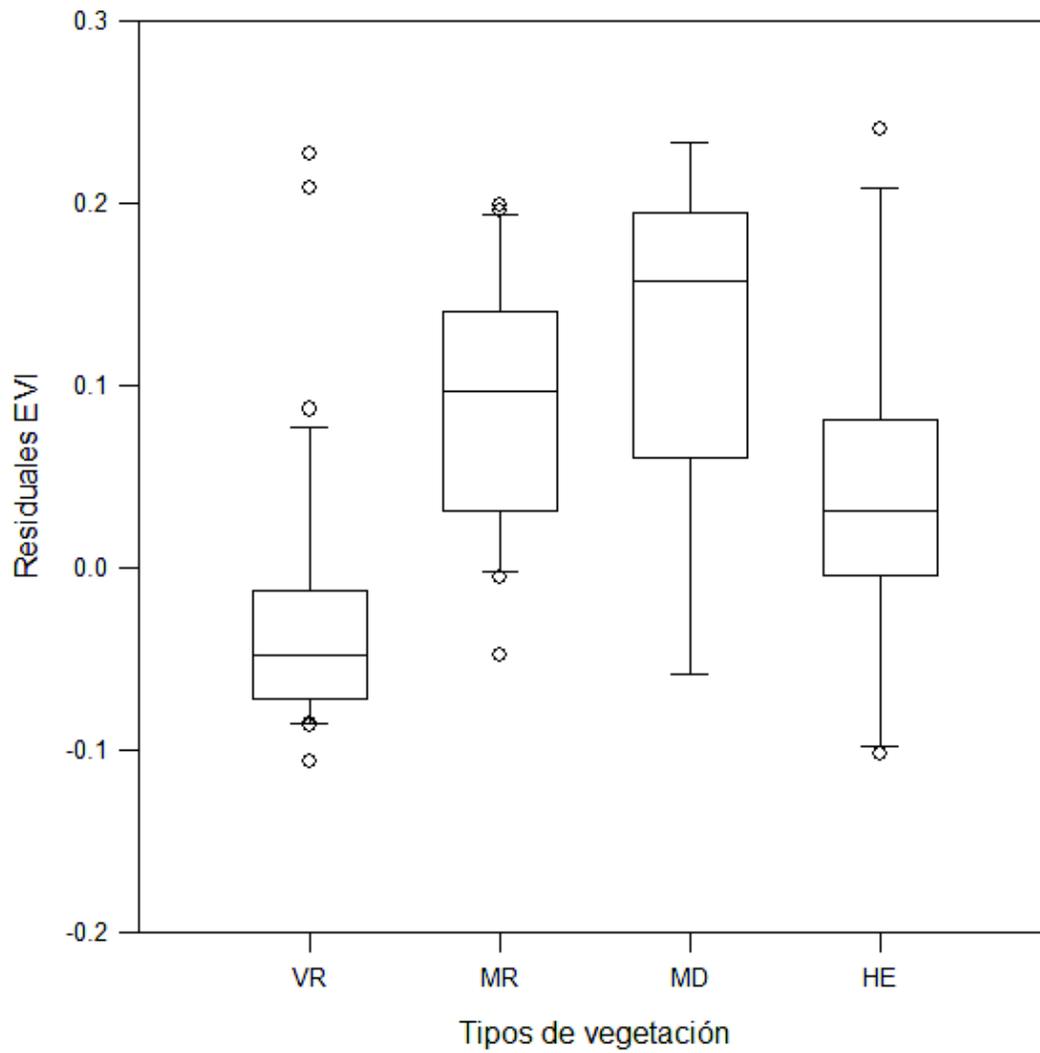


Figura 15. La Ciénega ($H= 29.19$, $P= <0.001$), $N= VR(33)$ $MR(20)$ $MD(9)$ $HE(19)$.

Cercos Vivos

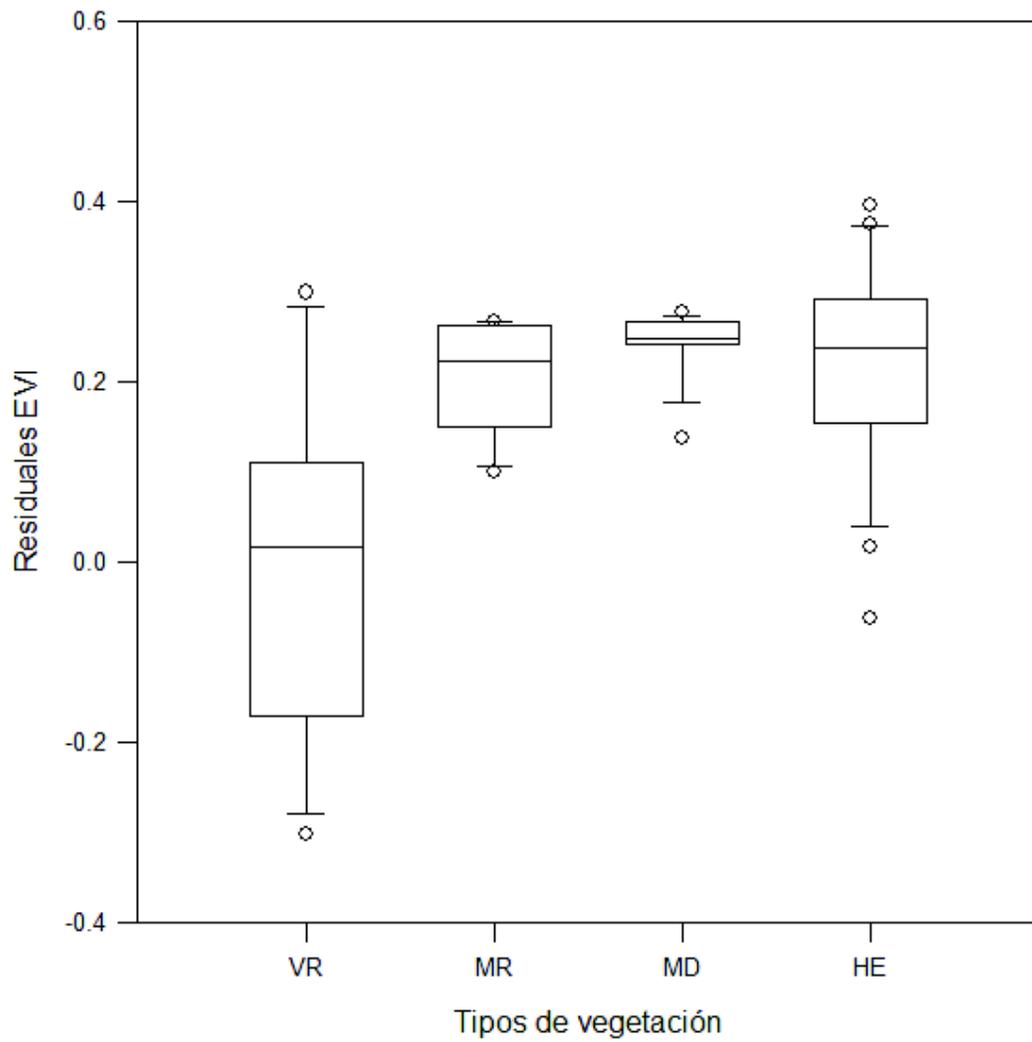


Figura 16. Cercos Vivos ($H= 15.92$ $P= 0.001$) $N=$ VR(11) MR(15) MD(19) HE(22).

El Cajón

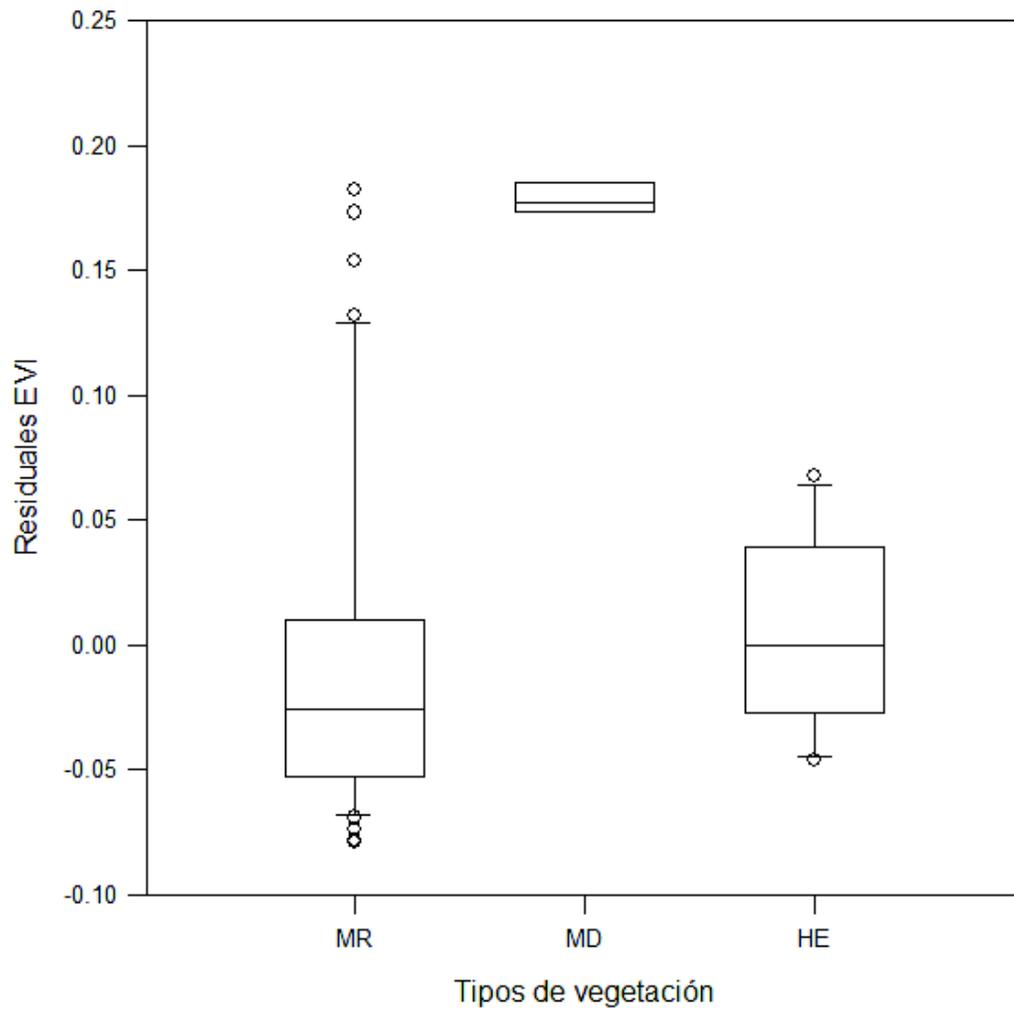


Figura 17. El Cajón ($H= 14.76$ $P= <0.001$) $N=$ MR(44) MD(5) HE(14).

Nogalera

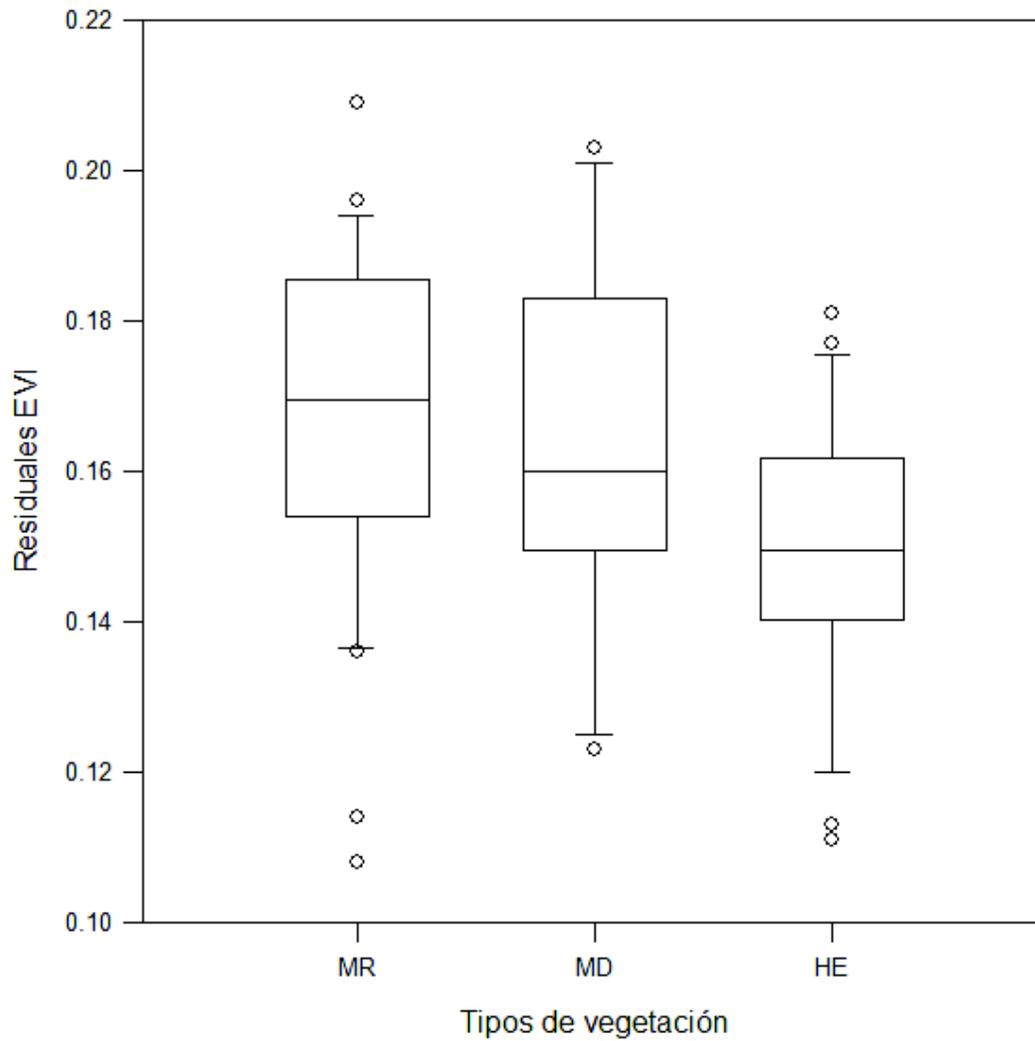


Figura 18. Nogalera ($H= 11.52$ $P= 0.003$) $N=$ MR(30) MD(12) HE(26).

La Galera

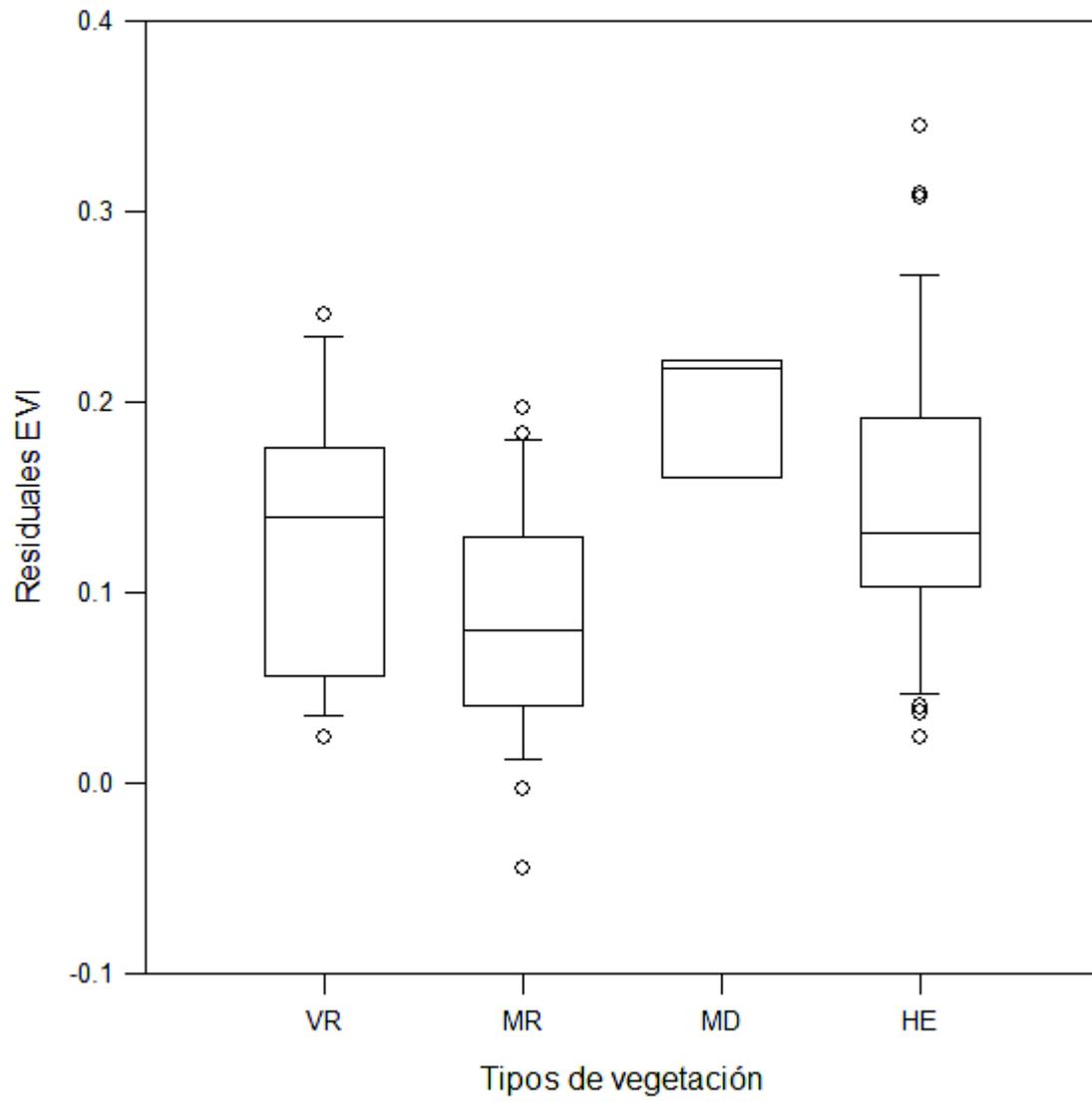


Figura 19. La Galera ($H= 15.86$ $P= 0.591$) $N= VR(18)$ $MR(29)$ $MD(3)$ $HE(38)$.

Rancho San Juan

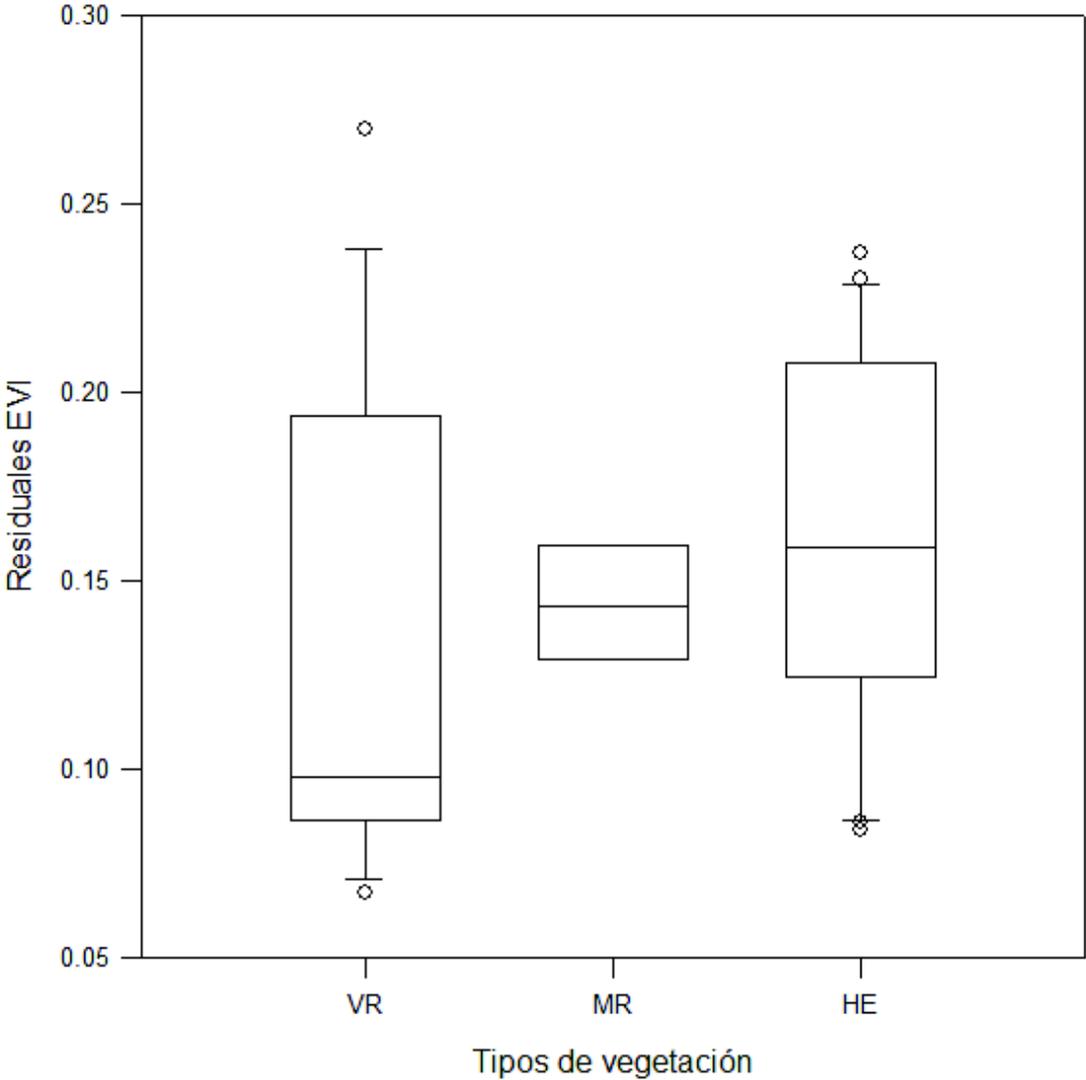


Figura 20. Rancho San Juan ($H= 5.45$ $P= 0.065$) $N= VR(17)$ $MR(8)$ $HE(20)$.

Rancho Tomás

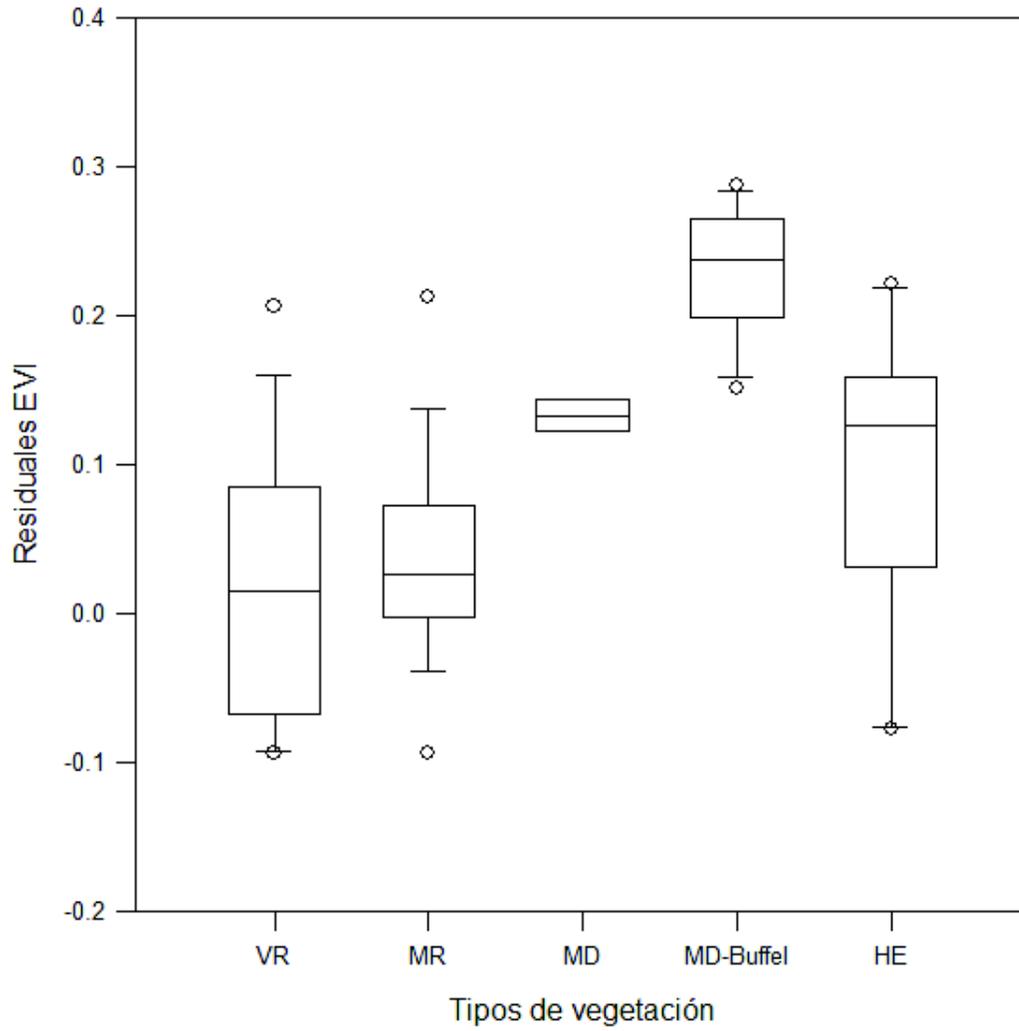


Figura 21. Rancho Tomás ($H= 33$ $P= <0.001$) $N=$ VR(17) MR(15) MD(5) MD-Buffel(11) HE(17).

V.7. Actividad fotosintética en sitios con vegetación ribereña y mezquital ribereño

En total se localizaron 5 sitios con presencia de vegetación ribereña y mezquital ribereño establecidas en los márgenes del río. Ya que los promedios de actividad fotosintética (EVI) son mayores para la vegetación ribereña que para el mezquital ribereño en la mayoría de los sitios, se procedió a analizar si estas diferencias son significativas.

Los resultados muestran diferencias entre las clases, para ambas temporadas (mayo y septiembre); aunque ambos tipos de vegetación se encuentran cerca del río y podrían tener la misma disponibilidad de agua, en la mayoría de los sitios la actividad fotosintética de la vegetación ribereña supera la del mezquital, sin embargo, no en todos los casos se encontraron diferencias estadísticamente significativas.

La Galera destaca como el único sitio en donde el mezquital ribereño supera en actividad fotosintética a la vegetación ribereña, durante mayo. Destaca también que en el Rancho San Juan la vegetación ribereña supera en actividad fotosintética al mezquital ribereño durante ambas temporadas.

Las figuras siguientes representan los sitios en donde se encontraron diferencias significativas en los valores de actividad fotosintética para alguna temporada, se incluye el valor del estadístico de prueba de Mann-Whitney (U) y el valor de significancia (P); los tipos de vegetación están representados por VR (vegetación ribereña) y MR (mezquital ribereño). El tamaño de muestra para cada tipo de vegetación está representado por N.

A continuación, se muestran los sitios que presentan diferencias significativas en los valores de actividad fotosintética (EVI) para septiembre (Figuras 22 y 23), y posteriormente se muestran los sitios que presentan diferencias significativas de EVI para mayo (Figuras 24 y 25).

Rancho San Juan

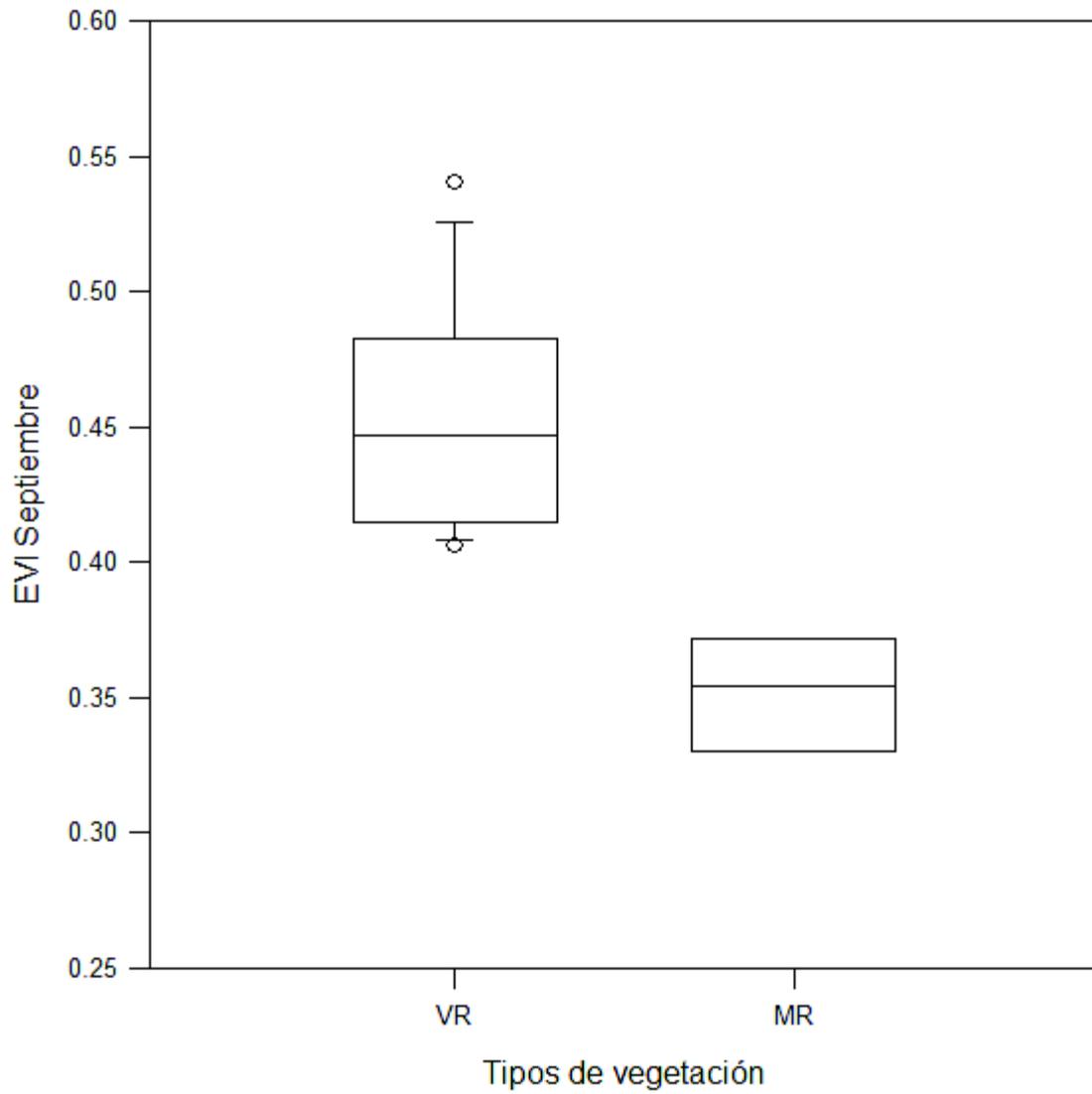


Figura 22. Rancho San Juan (U= 0, P= <0.001) N= VR(13) MR(7).

Rancho Tomás

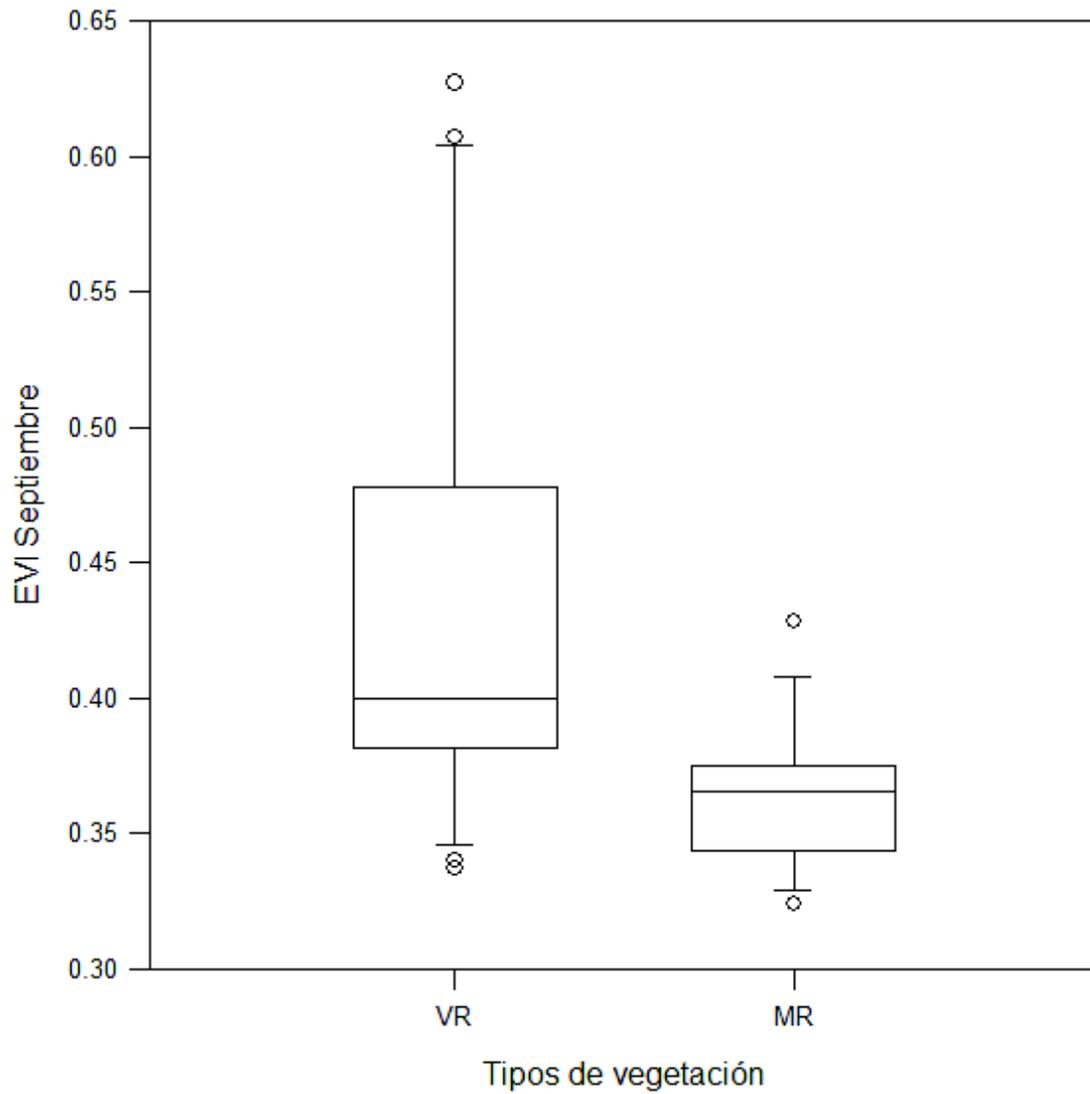


Figura 23. Rancho Tomás (U= 59, P= <0.001) N= VR(27) MR(13).

Rancho San Juan

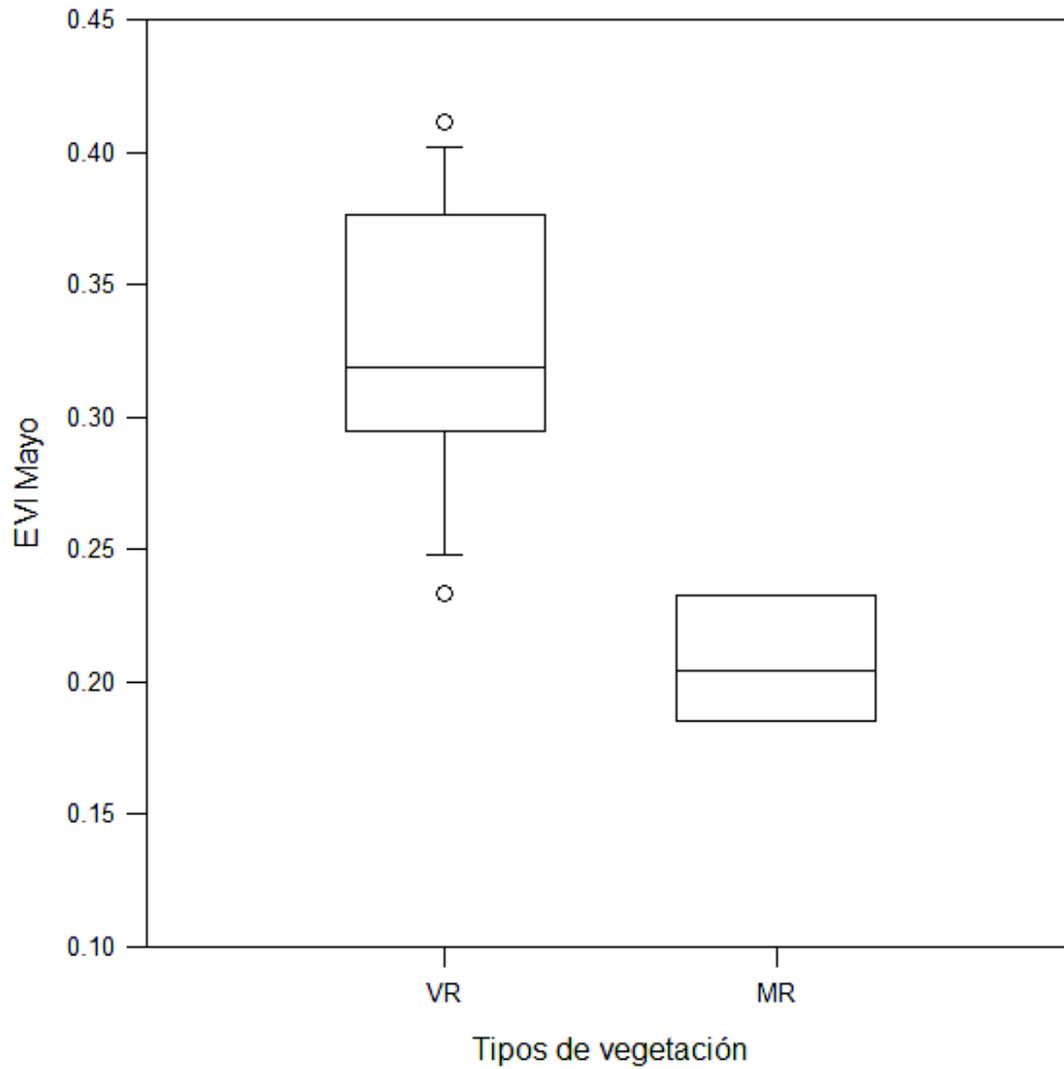


Figura 24. Rancho San Juan ($U= 1$, $P= 0.183$) $N= VR(13)$ $MR(7)$.

Cercos Vivos

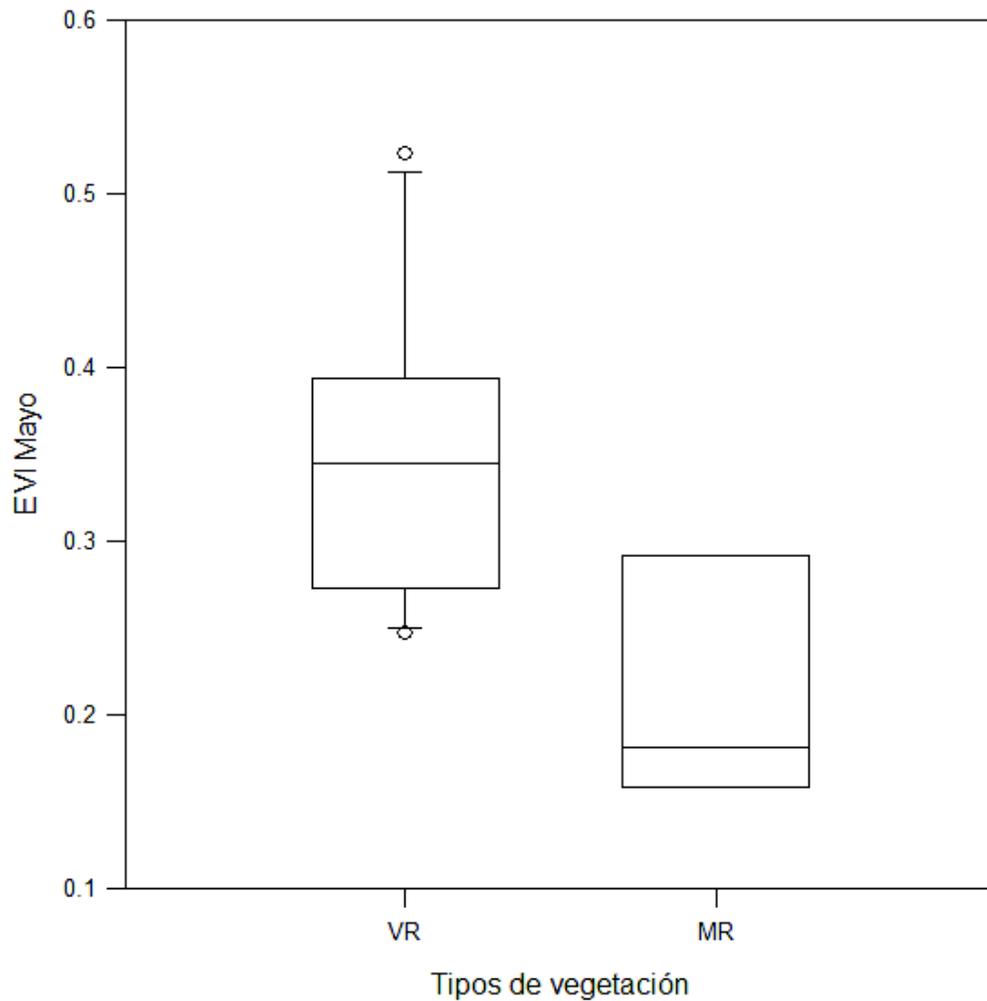


Figura 25. Cercos vivos ($U= 7$, $P= 0.010$) $N= VR(11)$ $MR(6)$

En la mayoría de los sitios la vegetación ribereña tiene mayor actividad fotosintética durante la temporada seca, pero también es importante señalar que aún durante la temporada de crecimiento (septiembre) hay sitios en donde la actividad fotosintética de la vegetación ribereña es mayor que la del mezquital ribereño. Lo anterior resalta la importancia de la vegetación ribereña-obligada y su relación con la provisión y mantenimiento de los servicios ecosistémicos asociados a la productividad.

V.8. Relación fotosíntesis-perturbación

El análisis realizado entre los promedios de actividad fotosintética de la vegetación ribereña durante septiembre y los valores del índice de perturbación muestran una tendencia negativa (Figura 26), en donde se observa que la actividad fotosintética es mayor en los sitios menos perturbados y disminuye en los sitios en donde la perturbación es mayor. La gráfica muestra los valores de EVI y del índice de perturbación correspondientes a todos los sitios de estudio.

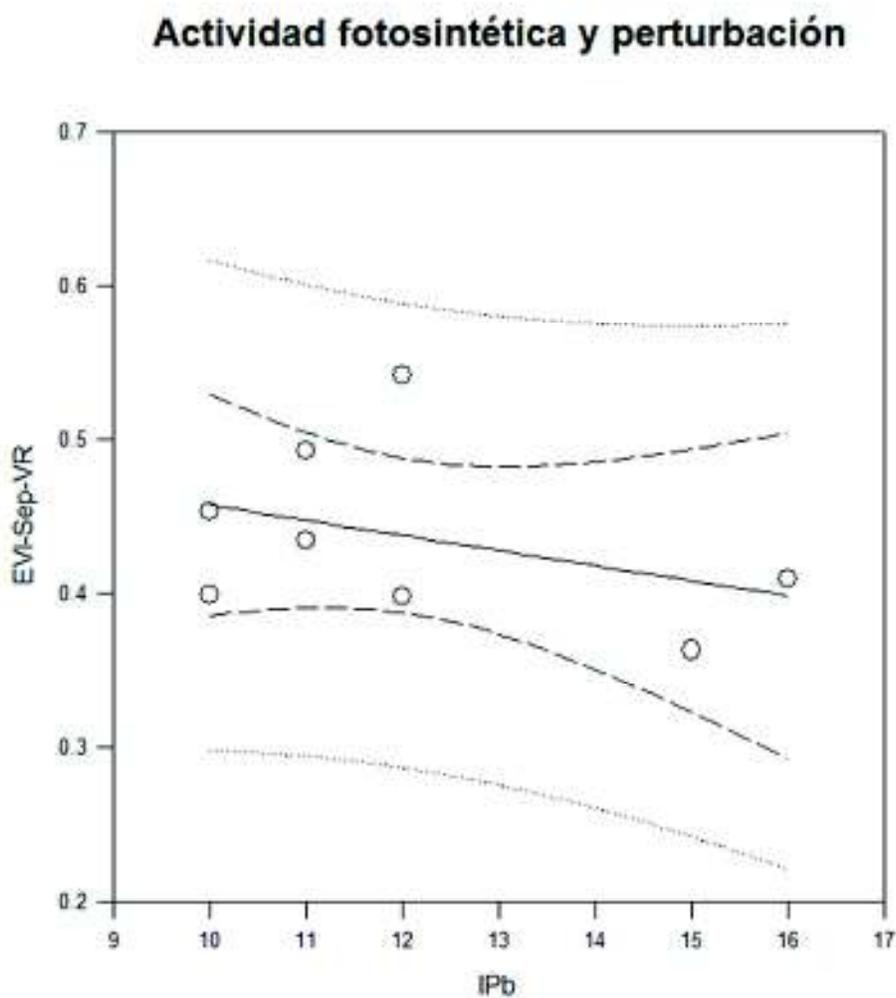


Figura 26. Regresión lineal entre valores de EVI (septiembre) para vegetación ribereña e índice de perturbación ($\alpha=0.050$, $r^2=0.142$).

En la mayoría de los sitios los valores altos de actividad fotosintética se relacionan con un grado de perturbación menor, aunque hay excepciones. Por ejemplo, hay un sitio con baja perturbación que tiene un promedio de EVI menor al del sitio más perturbado, también se puede observar que el máximo valor de EVI no corresponde a una perturbación baja sino intermedia. Sin embargo, de manera general se observa una relación inversa entre la actividad fotosintética y la perturbación, lo cual sugiere que los índices de la vegetación son indicadores efectivos del estado de salud ecológica de los ecosistemas ribereños en zonas áridas.

VI. DISCUSIÓN

VI.1 Perturbación en sitios ribereños

Las actividades humanas que implican un cambio de uso de suelo, así como la explotación de recursos como el agua y la vegetación, tienen impactos de diferentes magnitudes sobre los ecosistemas ribereños. La aplicación de índices para evaluar distintos parámetros de condición ambiental ha sido ampliamente utilizada en sitios con diferente grado de disturbio antropogénico (González y García, 2011; Mendoza, 2014; Zimmerman, 1993; Schneider y Melzer, 2003; Corigliano, 2008; Ramírez, 2010). El índice propuesto en el presente trabajo constituye una herramienta sencilla y fácil de aplicar para obtener información sobre el estado actual de la vegetación en ecosistemas ribereños en zonas áridas, considerando que éstos son sitios propensos a la transformación debido a la sobreexplotación de recursos como suelo, agua y vegetación.

El índice propuesto (IPb) mostró que los sitios con menor grado de perturbación (bajo-medio) son ranchos o se encuentran cerca de éstos, lo cual llama la atención ya que estos sitios se caracterizan por la presencia de algún tipo de manejo de recursos naturales debido a las actividades agrícolas y ganaderas. Algo que pudo haber influido en el resultado del índice fue que en el momento en el que se realizó el trabajo de campo no se observó una presencia dominante de ganado, lo cual no quiere decir que no la haya. Por otro lado, estos sitios presentaron características que indican una menor perturbación, como la presencia dominante de las especies ribereñas-obligadas *Populus fremontii* y *Salix gooddingii*, la presencia constante de corriente superficial y la ausencia de actividades recreativas.

Aunque se esperaría que los sitios al norte de la cuenca fueran los menos perturbados, debido a su lejanía con la capital del estado, estos resultaron tener un IPb intermedio. Ambos sitios se encuentran en el municipio de Cucurpe, y se caracterizan por presentar algún tipo de manejo (ganadería en uno y agricultura en otro). En el sitio Ciénega destaca la presencia de ganado, lo cual puede ser una razón por la que el estrato arbustivo tenga tan baja cobertura tanto en la vegetación ribereña como en el matorral desértico (<10%). El sitio Cercos Vivos destaca por la presencia de cercos de álamo y sauce en las orillas del río, utilizados por los

campesinos para proteger las parcelas de las crecientes de agua durante la temporada de lluvias.

Por otro lado, los sitios del sur fueron los que presentaron el mayor grado de perturbación (medio-alto), esto debido a que a sus alrededores se desarrollan actividades humanas intensivas. En el caso del sitio Nogalera, la existencia de extensos cultivos de nogal ubicados a menos de 500 metros del cauce del río y la ausencia de corriente superficial nos indican que el agua utilizada para los cultivos pudiera estar afectando la disponibilidad del recurso para el ecosistema. En el caso del sitio El Cajón (el cual obtuvo el valor más alto al aplicar el IPb), a pesar de tener una corriente superficial continua, la evidencia de presencia humana debido a la actividad recreativa que se lleva a cabo en el lugar, convierten a este sitio en el más perturbado de todos los sitios estudiados. Es importante mencionar que la actividad recreativa es relativamente reciente en comparación con las actividades productivas tradicionales en la zona e implica un manejo particular de los recursos, ya que para promover dicha actividad se privilegian ciertos servicios (servicios estéticos y educativos) sobre otros que pueden verse afectados (formación de suelo, infiltración y recarga) debido a la constante presencia humana.

VI.2 Composición, estructura y función de la vegetación ribereña y vegetación adyacente

Al analizar las coberturas podemos mencionar que una diferencia principal entre la vegetación ribereña y la vegetación desértica es que, por lo general, los estratos herbáceos y arbustivos son relativamente densos, llegando a cubrir el cien por ciento del suelo durante la temporada de lluvias (Stromberg *et al.*, 1996). Sin embargo, al analizar las coberturas en función de la perturbación, encontramos que en ningún sitio hubo coberturas del 100% para los estratos antes mencionados, ya que, 5 de los 8 sitios presentaron coberturas herbáceas menores al 70%, y 5 de los 8 sitios presentaron coberturas arbustivas menores a 25%, en vegetación ribereña. En el caso de las coberturas estimadas a partir de imágenes aéreas la diferencia es aún más marcada, pues la cobertura herbácea en todos los sitios no superó el 35%. Lo anterior puede ser un síntoma de que los ecosistemas ribereños en el río San Miguel presentan cierto grado de alteración que prevalece en toda la cuenca. El bajo porcentaje de cobertura arbustiva para los

sitios Rancho Aguilar, Ciénega y Rancho San Juan se puede deber a la presencia constante de ganado debido a que el pastoreo o ramoneo de las vacas tiene un efecto dañino sobre el estrato arbustivo (Clary y Kruse, 2004; Ames, 1977; Stromberg, 1993; Stromberg *et al.*, 2017; Malanson, 1993; Scott *et al.*, 2009, Zaines *et al.*, 2007; Webb y Leake, 2006).

Las especies vegetales que caracterizan estos ecosistemas son *Populus fremontii*, *Salix gooddingii*, *Baccharis salicifolia*, y aunque es común encontrar especies desérticas integradas al ecosistema ribereño (Scott *et al.*, 2009; Zaines *et al.*, 2007), la abundancia en la presencia de éstas, así como la ausencia de especies ribereñas-obligadas puede ser indicador de que un cambio drástico en el ecosistema está ocurriendo.

En la mayoría de los sitios las especies ribereñas-obligadas dominaron los estratos arbustivo y arbóreo, sin embargo, en los sitios con mayor perturbación dominaron *Prosopis velutina* y *Parkinsonia florida* y hubo una ausencia total de especies ribereñas-obligadas en el estrato arbóreo. Lo anterior, aunado a la intensidad de las actividades humanas que se desarrollan en estos sitios (Nogalera y El Cajón), nos indica que es probable que se esté llevando a cabo un proceso de transformación o transición de la vegetación. Otra posibilidad, difícil de constatar, es que en estos sitios nunca haya existido la presencia de especies ribereñas-obligadas, y que el ecosistema ribereño esté definido por diversas especies de *Prosopis* y *Acacias*. Sin embargo, la presencia de cactáceas como *Cylindropuntia leptocaulis* y *Lophocereus schottii* cerca del cauce del río en el sitio Nogalera constituye en definitiva un indicio de que el ecosistema ribereño presenta características más propias de desierto, lo que a su vez sugiere que la disponibilidad de agua para el ecosistema se encuentra muy limitada.

La especie de mezquite *Prosopis velutina* resultó ser dominante en tres de los sitios, para los muestreos de vegetación ribereña, y en la mayoría de los sitios, para los muestreos de matorral desértico. Varias especies de mezquite conforman parte de los sistemas ribereños en muchos lugares del suroeste de los Estados Unidos y el noroeste mexicano (Stromberg, 1993), sin embargo, estos se encuentran la mayoría de las veces asociados a otras especies leñosas como fresnos, álamos y sauces. En el presente trabajo no se cuestiona el hecho de que *Prosopis velutina* sea o no sea un elemento ribereño, si no que considera que su alta frecuencia y la ausencia de las asociaciones antes mencionadas coinciden con otros aspectos indicadores de transformación de los ecosistemas ribereños.

Es importante mencionar que, para los muestreos realizados en vegetación ribereña, el estrato arbustivo en la mitad de los sitios estuvo dominado por las especies indicadoras de disturbio *Ricinus communis* y *Nicotiana glauca*. Ambas especies son exóticas e invasoras, que se han naturalizado en muchas regiones del país y se caracterizan por estar presentes en lugares perturbados (CONABIO, 2012).

Se detectó la presencia de zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*) en los sitios Nogalera, El Cajón y Rancho Tomás. En el caso de los dos primeros la frecuencia de buffel fue muy baja, sin embargo, su localización (muy cercana al margen del río) es preocupante, ya que habla sobre la capacidad de invasibilidad de esta especie, debido a que muy seguramente no fue sembrada ahí sino probablemente en los alrededores y de alguna manera migró hacia el ecosistema ribereño. En el sitio Rancho Tomás se encontró zacate buffel en el muestreo para matorral desértico, las imágenes aéreas sirvieron para diferenciar claramente el área donde el zacate ha sido sembrado y el área donde no. En esta zona el área con buffel se encuentra desprovista casi totalmente de especies leñosas, mientras que la otra zona tiene mayor densidad de especies leñosas, lo cual corresponde al tratamiento que se les da a los matorrales naturales previo a la siembra de buffel, eliminando gran parte de la vegetación nativa (Castellanos *et al.*, 2013; Búrquez y Martínez-Yrizar, 1997).

De acuerdo con los resultados del índice de diversidad Shannon-Wiener, no hay un patrón que indique que los stands de vegetación ribereña son más diversos que los stands de matorral desértico. Esto puede deberse a que en el estudio no se consideraron las especies del estrato herbáceo para el cálculo de los índices, lo cual puede influir de manera importante en la riqueza de especies.

Tampoco se encontró una relación entre la diversidad y la perturbación, ya que hubo sitios con alta perturbación y baja diversidad, así como sitios con alta perturbación y alta diversidad. El valor más bajo de diversidad para vegetación ribereña se encontró en el sitio Ciénega, debido probablemente a la gran abundancia de la especie *Fraxinus velutina*. En el matorral desértico, el sitio Nogalera fue el que obtuvo el mayor índice de diversidad, así como la mayor riqueza con un total de 14 especies representativas el estrato arbustivo y arbóreo. Es interesante que el sitio Nogalera, con alta perturbación en el ecosistema ribereño (principalmente por la actividad agrícola y por la ausencia de corriente superficial), presente

alta diversidad en el matorral desértico. Lo anterior coincide con la idea de que los ecosistemas ribereños son altamente sensibles a los cambios en la disponibilidad de agua (Glenn y Nagler, 2005; Lite y Stromberg, 2005; Webb y Leake, 2003; Stromberg *et al.*, 1996; Stromberg, 1998), y dichos cambios no necesariamente tienen las mismas consecuencias en los ecosistemas desérticos adyacentes, cuyas especies están adaptadas para sobrevivir a condiciones de sequía extrema.

En cuanto a la actividad fotosintética, representada por el Índice Mejorado de la Vegetación (EVI), se encontró que no hay una variación considerable entre los valores de la vegetación ribereña entre temporadas, esto puede ser debido a la continua disponibilidad de agua que tiene esta vegetación. Sin embargo, es importante destacar que, aunque el mezquital ribereño se encuentra localizado en los mismos sitios que la vegetación ribereña (y se supone tienen la misma disponibilidad de agua), sus valores de actividad fotosintética presentan mayor variación entre temporadas, sugiriendo que el mezquital ribereño depende en mayor proporción de la precipitación que del agua subterránea. También se encontró que la vegetación ribereña presenta valores mayores que el mezquital ribereño para la mitad de los sitios durante la temporada de crecimiento, lo cual sugiere que aun cuando existe disponibilidad de agua gracias a la precipitación, la vegetación ribereña pudiera ser más productiva que el mezquital ribereño.

Lo anterior podría estar relacionado con algunas características del suelo promotoras de la productividad, ya que, según lo reportado por Trujillo (2014), se sabe que el carbono total y el nitrógeno total son menores en suelos de mezquital y que los suelos de la vegetación ribereña presentan mayor actividad micorrízica.

La vegetación ribereña en el sitio Ciénega presenta un valor ligeramente mayor para la temporada seca. Esto se podría deber a que el sitio se encuentra localizado en una zona de inundación en la que durante todo el año se mantienen niveles estables de humedad.

El análisis de estacionalidad muestra que en la mayoría de los sitios el matorral desértico presenta diferencias en actividad fotosintética al compararlo con los otros tipos de vegetación. Durante ambas temporadas el matorral desértico tuvo valores menores que el mezquital ribereño y que la vegetación ribereña. Esto es consistente con el hecho de que la

disponibilidad de agua en las zonas ribereñas promueve la productividad de la vegetación (Stromberg, 2007; Richardson *et al.*, 2007; Malanson, 1993).

Tomando en cuenta que los índices de la vegetación tales como el EVI nos dan información sobre la actividad fotosintética y ésta a su vez está relacionada con varios parámetros ecosistémicos y procesos como productividad primaria, fenología, fijación de carbono, evapotranspiración, eficiencia en el uso del agua y disminución de agua subterránea (Glenn *et al.*, 2008), es relevante el hecho de que los valores de EVI en la vegetación ribereña estudiada en este trabajo disminuyen conforme aumenta la perturbación. Si bien no se utilizaron mediciones de campo para relacionar directamente los valores de EVI con algún parámetro de la vegetación, la tendencia encontrada coincide con otros estudios en donde se ha encontrado una relación entre índices de la vegetación y diversos parámetros del ecosistema y de la vegetación ribereña como flujos de agua superficial, evapotranspiración de la vegetación, estructura del dosel y disponibilidad de agua para especies leñosas (Nguyen, 2015; Johansen y Phinn, 2006; Nagler, 2005; Aguilar *et al.*, 2012).

En términos generales, con base en lo observado en este estudio, se puede inferir que los ecosistemas ribereños en la cuenca del río San Miguel presentan alteraciones debido a la acción humana y que cada sitio responde de manera distinta a dichas alteraciones. En el caso de los sitios más perturbados, los cuales están situados en la parte sur de la cuenca, la intensidad de las actividades que ahí se desarrollan, así como su cercanía con la ciudad influyen directamente en la transformación de la vegetación ribereña.

VII. CONCLUSIONES

El aumento en el desarrollo de actividades humanas asociadas al cambio de uso del suelo, aumenta la perturbación en los ecosistemas ribereños en el río San Miguel. Los sitios con mayor índice de perturbación se ubican al sur de la cuenca y son lugares en donde se desarrollan actividades económicas y sociales (agricultura comercial y actividades recreativas) con mayor intensidad que en el resto de los sitios.

El uso de plataformas aéreas no tripuladas permite el análisis detallado de la vegetación, y facilita la descripción de los sitios desde una perspectiva paisajística. Las imágenes aéreas son útiles para discriminar entre ciertos tipos de vegetación, y resultan eficientes para diferenciar vegetación ribereña obligada de la facultativa.

Una mayor perturbación antropogénica está relacionada con una menor actividad fotosintética del ecosistema ribereño. A pesar de desarrollarse en el mismo sitio, la vegetación ribereña mostró una mayor actividad fotosintética que el mezquital ribereño.

La metodología utilizada en el presente estudio integra técnicas elementales de percepción remota, dentro de las cuales se incluye el análisis de imágenes satelitales y aéreas. La utilización de Plataformas Aéreas No Tripuladas para el estudio de ecosistemas ribereños constituye una herramienta potencial para posteriores estudios a escala regional. Debido a la extensión reducida de estos ecosistemas, dichas plataformas resultan ideales para su estudio y mapeo, ya que no se requieren cubrir extensas áreas de territorio para registrar las zonas ribereñas.

El presente estudio aporta información sobre el estado ecológico actual de los ecosistemas ribereños en una de las principales cuencas del estado de Sonora. En dicha región se han realizado trabajos que abordan diversos aspectos sociales, económicos y biológicos, sin embargo, la información en conjunto sobre esta zona es escasa. Por la cantidad de servicios eco-sistémicos que esta región provee y por la falta de regulación en la explotación de sus recursos naturales, resulta imperativo desarrollar estrategias que protejan y conserven estos ecosistemas.

VIII. RECOMENDACIONES

Estudios futuros en el río San Miguel podrán aplicar la metodología planteada en este documento para ampliar el conocimiento sobre el estado ecológico de otros sitios de estudio, buscando generar un diagnóstico de toda la cuenca. Se recomienda incluir la diversidad del estrato herbáceo, así como de especies subacuáticas, para tener un registro completo sobre diversidad.

En cuanto a las Plataformas Aéreas No Tripuladas, se sugiere la utilización de alas fijas (en lugar de multirrotores con hélices) para un mapeo más extensivo del hábitat ribereño, ya que estas plataformas cubren más extensión por tener mayor tiempo de vuelo.

El índice de perturbación propuesto puede ser aumentado, agregando más variables que incluyan características morfológicas, hidrológicas y biológicas. Estudios próximos deberán integrar la información sobre los usos del agua en actividades humanas, de tal manera que se establezca con claridad la cantidad de agua utilizada por las actividades de subsistencia, las comerciales y las industriales, en la cuenca. Con lo anterior se podrá regular de mejor manera el recurso hídrico, evitando su detrimento en los sistemas ecológicos.

Es necesario conjuntar metodologías como las descritas en este trabajo, con otras que revisen la calidad del agua, para así desarrollar una propuesta de monitoreo en las cuencas del estado, considerando que la mayoría se encuentran bajo condiciones graves de sobreexplotación y deterioro ambiental.

No se deberá considerar el presente estudio como una muestra de lo que sucede a nivel de toda la cuenca, ya que los sitios de estudio cubren solamente una breve parte de los ecosistemas ribereños del río San Miguel y, como se ha visto en los resultados, cada uno tiene características muy variables.

El río San Miguel constituye una cuenca con alto valor cultural y con potencial educacional y recreativo. Se sugiere que en los sitios en donde hay actividad recreativa se implementen estrategias de educación ambiental para promover el cuidado de los ecosistemas ribereños en la región, así como trabajar y capacitar directamente a los pobladores de la cuenca para formar promotores comunitarios que monitoreen, administren y protejan sus recursos naturales.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, C., Zinnert, J., Polo, M., Young, D. 2012. NDVI as an indicator for changes in water availability to woody vegetation. *Ecological Indicators*. 23: 290-300.
- Akashah O.Z., Neale C.M.U., Jayanthi H. 2008. Detailed mapping of riparian vegetation in the middle Rio Grande River using high resolution multi-espectral airborne remote sensing. *Journal of Arid Environments*. 72: 1734-1744.
- Allan, D. 2004. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 35:257-284.
- Alfie, M. 2015. Conflictos socio-ambientales: la minería en Wirikuta y Cananea. El Cotidiano en línea, mayo-junio. *Sociedad y medio ambiente*. 191: 97-108.
- Álvarez-Yépez, J., Martínez-Yrizar, A., Búrquez, A., Lindquist, C. 2008. Variation in vegetation structure and soil properties related to land use history of old-growth and secondary tropical dry forest in northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*. 256: 355-366.
- Ames, C.1977. Wildlife Conflicts in Riparian Management: Grazing. En: Importance, Preservation and Management of Riparian Habitt: A Symposium. Technical coordinators: Johnson, R., Jones, D. USDA Forest Service General Technical Report RM-43. Pp: 49-52.
- Anderson, K., Gaston, K. 2013. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 11(3): 138-146.
- Arriaga, L., Castellanos, A., Moreno, E., Alarcón, J. 2004. Potential ecological distribution of alien invasive species and risk assessment: a case study of buffel grass in arid regions of Mexico. *Conservation Biology*. 18:6. 1504-1514.
- Atondo, A., del Castillo, J., Gómez, A., Pérez, A., Nubes, G., Villalba, S., Salcido, A. 2012. Contaminación del agua y suelo en el ecosistema río Agua Prieta, Sonora, México. Universidad de Sonora. *Biotecnia*. XV(1): 3-11.
- Balvanera, P., Cotler, H. 2009. Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. *En: Capital Natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO. México. Pp: 185-245.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., Huete, A. R. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*. 13: 95-120.
- Box, E., Holben, B., Kalb, V. 1989. Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux. *Vegetation*. 80: 71-89.
- Brauman, K., Daily, G., Ka'eo, T., Mooney, H. 2007. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources*. 32: 6.1-6.32.

- Braun-Blanquet J. 1979. Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales. Blume. Barcelona, España. 820 pp.
- Bravo-Peña, L., Doode, S., Castellanos, A., Espejel, I. 2010. Políticas rurales y pérdida de cobertura vegetal. Elementos para reformular instrumentos de fomento agropecuario relacionados con la apertura de praderas ganaderas en el noroeste de México. *Región y Sociedad*. 48: 3-35.
- Bravo-Peña, L. 2009. Ganadería y cambios de la cubierta vegetal en la región central de Sonora. Impactos sobre el paisaje y vulnerabilidad de los productores pecuarios en el contexto del cambio climático. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. Hermosillo, Sonora, México.
- Bravo-Peña, L., Castellanos-Villegas, A., Alatorre-Cejudo, L., Torres-Olave, M. 1992. Tendencias temporales el Índice Mejorado de la Vegetación (EVI) en cinco coberturas naturales del occidente, norte y noroeste de México durante el periodo 2000-2013. *En: Ecología, recursos naturales y medio ambiente en Sonora*. Editor: José Luis Moreno. El Colegio de Sonora.
- Breckenridge, R., Dakins, M. 2011. Evaluation of Bare Ground on Rangelands Using Unmanned Aerial Vehicles: A Case Study. *GIScience & Remote Sensing*. 48(1):74-85.
- Brenner, J. 2010. What drives the conversion of native rangeland to buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) pasture in Mexico's Sonoran Desert?: The social dimensions of a biological invasion. *Human Ecology*. 38: 495-505.
- Brock, J. 1994. *Tamarix* spp. (Salt Cedar), an Invasive Exotic Woody Plant in Arid and Semi-arid Riparian Habitats of Western USA. *En: de Waal et al. (eds.), Ecology and Management of Invasive Riverside Plants*. John Wiley & Sons Ltd. Pp. 27-44.
- Bryson, M., Reid, A., Hung, C., Ramos, F., Sukkarieh, S. 2014. Cost-Effective Mapping Using Unmanned Aerial Vehicles in Ecology Monitoring Applications. *Experimental Robotics*. 509-523.
- Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A. 1997. Conservation and Landscape Transformation in Sonora, Mexico. *Journal of the Southwest*. 39(3/4): 371-398.
- Busch, D., Smith, S. 1995. Mechanisms associated with decline of Woody species in riparian ecosystems of the southwestern U.S. *Ecological Monographs*. 65(3): 347-370.
- Calvario, J. 2007. Masculinidad, riesgos y padecimientos laborales. Jornaleros agrícolas del poblado Miguel Alemán, Sonora. *Región y Sociedad*. 40: 39-72.
- Camarena, B., Ochoa, C., Valenzuela, A. 2014. Comunicación y percepción del riesgo por compuestos orgánicos persistentes en jornaleros agrícolas de Sonora, México. *Polis Revista Latinoamericana*. 39: 1-22.
- Carabias, J., Landa, R. 2005. Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México. Universidad Nacional Autónoma de México, El Colegio de México, Fundación Gonzalo Río Arronte. México.

- Carabias, J. 2014. "Minería y naturaleza". *Reforma*. Opinión. México. Sábado 30 de agosto del 2014.
- Castellanos, A., Celaya, H., Hinojo C., Ibarra, A., Romo, J. R. 2013. Biodiversity effects on ecosystem function due to land use: the case of buffel savannas in the sky islands seas in the central region of Sonora. *USDA Forest Service Proceedings*. RMRS-P-67.
- Castellanos, A., Bravo, L., Koch, G., Llano, J., López, D., Méndez, R., Rodríguez, J., Romo, R., Sisk, T., Yanes-Arwayo, G. 2010. Impactos ecológicos por el uso del terreno en el funcionamiento de ecosistemas áridos y semiáridos. *En: Diversidad Biológica de Sonora*. Editores: Molina, F., Van Devender, T. UNAM. CONABIO. Pp: 157-186.
- Castellanos, A., Yanes, G., Valdez-Zamudio, D. 2002. Drought-Tolerant Exotic Buffel-Grass and Desertification. *En: Weeds across borders. Proceedings of a north American Conference*. Editor: B. Tellman. Arizona-Sonora Desert Museum. Pp: 99-112.
- Chacón, R. 2014. "Advierten en Sonora desastre ecológico". *Reforma*. Nacional. México. Miércoles 13 de agosto del 2014.
- Clary, W., Kruse, W. 2004. Livestock Grazing in Riparian Areas: Environmental Impacts, Management Practices and Management Implications. *En: Riparian areas of the Southwestern United States Hydrology Ecology and Management*. Editores: Baker, M.B. *et al.* CRC Press, Boca Raton, FL. Pp. 237-259.
- Cohen, W., Goward, S. 2006. Landsat's Role in Ecological Applications of Remote Sensing. *BioScience*. 54(6): 535-545.
- CONABIO. 2012. Malezas de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/home-malezas-mexico.htm>
- CONAGUA. 2009. Disponibilidad media anual de agua subterránea. Acuífero (2625) Río San Miguel Estado de Sonora. Comisión Nacional del Agua. México.
- CONAGUA. 2012. Atlas digital del agua. Sistema Nacional de Información del Agua. Acuíferos continentales sobreexplotados. Comisión Nacional del Agua. <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo21.html>
- CONAGUA. 2015a. Disponibilidad media anual de agua subterránea. Acuífero (2625) Río San Miguel Estado de Sonora. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. México.
- CONAGUA. 2015b. Estadísticas del agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. México. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2015.pdf>
- CONAPO. 2015. Datos de proyecciones. Estimaciones y proyecciones de la población por entidad federativa. Periodo 2010-2030. Consejo Nacional de Población. México. http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos

- Corigliano, M. 2008. Índices para evaluar la calidad ambiental en ríos serranos urbanos mediante indicadores. *Revista de la Universidad Nacional de Río Cuarto*. 28(1-2): 33-54.
- Cuevas, M., Garrido, A., Pérez, J., Iura, D. 2010. Estado actual de la vegetación en las cuencas de México. *En: Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. Editores: Cotler, H. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto de Ecología y Cambio Climático. Pp. 50-59.
- Daily, G., Alexander, S., Ehrlich, P., Goulder, L., Lubchenco, J., Matson, P., Mooney, H., Postel, S., Schneider, S., Tilman, D., Woodwell, G. 1997. Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems. *Issues in Ecology*. Ecological Society of America. Number 2.
- DeBano, L. F., Schmidt, L. J. 2004. Definitions and Classifications. *En: Riparian areas of the Southwestern United States Hydrology Ecology and Management*. Editores: Baker, M.B. *et al.* CRC Press, Boca Raton, FL. Pp. 11-27.
- De la Fuente, A., Olivera, B., Arredondo, O., Ayrikyan, T., Castillo, M., Escamilla, O., Garduño, J., Guzmán, S., Llano, M. 2017. Las actividades extractivas en México: Estado actual. Anuario 2016. Fundar, Centro de Análisis e Investigación, A.C. México.
- De la O-Villanueva, M., Meza-Figueroa, D., Maier, R., Moreno, D., Gómez-Álvarez, A., del Río-Salas, R., Mendivil, H., Montjo, A. 2013. Procesos erosivos en jales de la Presa I de Nacozari de García, Sonora y su efecto en la dispersión de contaminantes. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 65(1): 27-38.
- De La Torre, H., Sandoval, S. 2015. Ecological Transformation and Territorial Synergies in the Hermosillo, Sonora Coastal Strip. *Frontera Norte*. 27(54): 143-170.
- Díaz-Caravantes, R., Sánchez-Flores, E. 2011. Water transfer effects on peri-urban land use/land cover: A case study in a semi-arid region of Mexico. *Applied Geography*. 31(2): 413-425.
- Díaz-Caravantes, R., Wilder, M. 2014. Water, Cities and Peri-urban Communities: Geographies of Power in the Context of Drought in Northwest Mexico. *Water Alternatives*. 7(3): 499-417.
- Doolittle, W. 2003. Channel changes and living fencerows in eastern Sonora, Mexico: myopia in traditional resource management? *Geografiska Annaler*. 85 A (3-4): 247-261.
- Dunford, R., Michel, K., Gagnage, M., Piégay, H., Trémelo, M. 2009. Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest. *International Journal of Remote Sensing*. 30(19): 4915-4935.
- Ely, C., Kepner, W., Goodrich, D., Nash, M. 2013. Investigating historic parcel changes to understand land use trends. Methodology and application for the San Pedro River watershed. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. EPA/600/R-13/112. ARS/295385

- Evaluación de los Ecosistemas para el Milenio (EEM). 2005. Ecosistemas y bienestar humano: síntesis. Island Press. Washington, DC.
- Evans, L. 2013. Drone Ecology. *BioBriefs. BioScience*. 63(9). doi:10.1525/bio.2013.63.9.18
- Evans, S. 2006. La angustia de La Angostura: consecuencias socioambientales por la construcción de presas en Sonora. *Signos Históricos*. Universidad Autónoma de México Unidad Iztapalapa. 16: 46-78.
- Ewel, K., Cressa, C., Kneib, R., Lake, P., Levin, L., Palmer, M., Snelgrove, P., Wall, D. 2001. Managing Critical Transition Zones. *Ecosystems* 4: 452-460.
- Ezcurra, E., Peters, E., Búrquez, A., Mellink, E. 2002. Los desiertos de Baja California y Sonora. En: *Áreas silvestres: las últimas regiones vírgenes del mundo*. Editores: Mittermeier, R., Mittermeier, C., Robles-Gil, P., Pilgrim, J., Fonseca, G., Brooks, T., Konstant, W. Cemex. México.
- Félix, F. 2009. Análisis del escurrimiento de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México, durante el 2004. Tesis Maestría en Geología. Universidad de Sonora.
- Ffolliott, P. F., L. F. DeBano, M. B. Baker, D. G. Neary, K. N. Brooks. 2004. Hydrology and impacts of disturbances on hydrologic function. *En: Baker, M.B. et al. (eds.), Riparian areas of the Southwestern United States Hydrology Ecology and Management*. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 51-76.
- Fimbres, A., Lizárraga, J. 2009. Consumo de Agua y Nitrógeno en Espárrafo (*Asparragus officinalis* L.) de Baja Población de Plantas con Riego por Cinta. *Revista Agraria Nueva Época*. 6(1,2,3): 10-13.
- Franklin, J. 2013. Mapping Vegetation from Landscape to Regional Scales. *En: En: Vegetation Ecology*. Editores: Van der Maarel, E. and Franklin, J. University of Groningen, The Netherlands. Arizona State University, USA. Wiley-Blackwell. Pp: 486-508.
- Franklin, K., Lyons, K., Nagler, P., Lampkin, D., Glenn, E., Molina-Freaner, F., Markow, T., Huete, A. 2006. Buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) land conversion and productivity in the plains of Sonora, Mexico. *Biological Conservation*. 127: 62-71.
- Franklin, K., Molina-Freaner, F. 2010. Consequences of Buffelgrass Pasture Development for Primary Productivity, Perennial Plant Richness, and Vegetation Structure in the Drylands of Sonora, Mexico. *Conservation Biology*. 24(6): 1664-1673.
- Galaz, O. 2016. Estructura y diversidad de la comunidad de plantas del hábitat ribereño de la parte baja del río San Miguel, Sonora. Tesis de licenciatura. Universidad de Sonora.
- Gandarilla, F. 2015. Evaluación de la dinámica de cambio de cobertura de suelo en las subcuencas río San Miguel y río Zanjón, Sonora. Tesis Licenciatura en Biología. Universidad de Sonora.
- Getzin, S., Nuske, R., Wiegand, K. 2014. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) to Quantify Spatial Gap Patterns in Forests. *Remote Sensing*. 6:6988-7004.

- Glenn, E., Huete, A., Nagler, P., Nelson, S. 2008. Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape. *Sensors*. 8: 2136-2160.
- Glenn, E., Nagler, P. 2005. Comparative ecophysiology of *Tamarix ramosissima* and native trees in western U. S. riparian zones. *Journal of Arid Environments*. 61: 419-446.
- Gómez-Álvarez, A., Villalba-Atondo, A., Acosta-Ruíz, G., Castañeda-Olivares M., Kamp, D. 2004. Metales pesados en el agua superficial del Río San Pedro durante 1997 y 1999. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 20(1) 5-12.
- González, M., García, D. 2011. Riparian Quality Index (RQI): A methodology for characterising and assessing the environmental conditions of riparian zones. *Limnetica*. 30(2): 235-254.
- González, F. 2012. Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Pp: 105-143.
- Goodrich D.C., Chehbouni A., Goff B., MacNish B., Maddock T., Moran S., Shuttleworth W.J., Williams D.G., Watts C., Hipps L.H., Cooper D.I., Schieldge J., Kerr Y.H., Arias H., Kirkland M., Carlos R., Cayrol P., Kepner W., Jones B., Avissar R., Begue A., Bonnefond J.-M., Boulet G., Dedieu G., Elguero E. Eichinger W.E., Everitt J., Garatuza-Payan J., Gempko V.L., Gupta H., Harlow C., Hartogenesis O., Helfert M., Holifield C., Hymer D., Kahle A., Keefer T., Krishnamoorthy S., Lhomme J.-P., Nouvellon Y., Pinker R., Peters C., Pool D., Qi J., Rambal S., Rodriguez J., Santiago F., Sano E., Schaeffer S.M., Schulte M., Scott R., Shao X., Snyder K.A., Sorooshian S., Unkrich C.L., Whitaker M., Yucel I. 2000. Preface paper to the Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere (SALSA) Program special issue. *Agricultural and Forest Meteorology* 105: 3-20.
- Granados-Sánchez D., Hernández-García M.Á., López-Ríos G.F. 2006. Ecología de las zonas ribereñas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 12(1): 55-69.
- Grémillet, D., Puech, W., Garcon, V., Boulinier, T., Le Maho, Y. 2012. Robots in Ecology: Welcome to the machine. *Open Journal of Ecology*. 2(2)49-57.
- Gurevitch, J., Scheiner, S., Fox, G. 2006. Ecosystems and Landscape, Landscape Ecology. *En: The Ecology of Plants*. Sinauer Associates. Pp: 369-386.
- Gurevitch, J., Scheiner, S., Fox, G. 2006. Disturbance and Succession. *En: The Ecology of Plants*. Sinauer Associates. Pp: 283-305.
- Gurevitch, J., Scheiner, S., Fox, G. 2006. Global Change: Humans and Plants. *En: The Ecology of Plants*. Sinauer Associates. Pp: 485-513.
- Gurevitch, J., Scheiner, S., Fox, G. 2006. Communities in Landscapes. *En: The Ecology of Plants*. Sinauer Associates. Pp: 353-367.

- Gurevitch, J., Scheiner, S., Fox, G. 2006. Community Properties. *En: The Ecology of Plants*. Sinauer Associates. Pp: 205-223.
- Haro, A. 2007. Globalización y salud de los trabajadores. Jornaleros agrícolas y producción de uva en Pesqueira, Sonora. *Región y Sociedad*. 40: 73-105.
- Herández, M. 2013. Gestión del agua: un Recurso de Uso Común en el ejido San Miguel de Horcasitas, 1992-2012. Tesis Maestría en Ciencias Sociales. El Colegio de Sonora.
- Hernández, H. 2006. La vida en los desiertos mexicanos. Fondo de Cultura Económica. México.
- House-Peters, L., Scott, C. 2011. Assessing the Impacts of Land Use Change on Water Availability, Management, and Resilience in Arid Region Riparian Corridors: A Case Study of the San Pedro and Rio Sonora Watersheds in Southwestern USA and Northwestern Mexico. XIV World Water Congress of the International Water Resources Association. Porto de Galinhas, Brazil.
- Huete, A., Didan, K., Miurna, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of the Environment*. 83: 195-213.
- INEGI. 2016a. Anuario estadístico y geográfico de Sonora 2016. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825083694>
- INEGI. 2016b. Estructura económica de Sonora en síntesis. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825089801>
- INEGI. 2015. México en cifras. Sonora. Indicadores-Mapas-Tabulados-Publicaciones-Servicios. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=26#>
- INEGI. 2011. Censo de población y vivienda 2010: Tabulados del cuestionario Básico. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2010/>
- INEGI. 2007. México en cifras. Sonora. Indicadores-Mapas-Tabulados-Publicaciones-Servicios. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=26#>
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/index.htm>
- Ivosevic, B., Han, Y., Kwon, O. 2015. The use of conservation drones in ecology and wildlife research. *Journal of Ecology and Environment*. 38(1): 113-118.
- Jensen, A., Hardy, T., McKee, M., Chen, Y. 2011. Using a Multispectral Autonomous Unmanned Aerial Remote Sensing Platform (AggieAir) for rRiparian and Wetlands Applications. IGARSS. 3413-3416.
- Jensen, J. R. 2005. Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective. Third edition. Prentice-Hall Inc. Estados Unidos.

- Johansen, K., Phinn, S. 2006. Mapping structural parameters and species composition of riparian vegetation using IKONOS and Landsat ETM+ Data in Australian Tropical Savannas. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 72: 1, 71-80.
- Kepner, W., Watts, C., Edmonds, Curtis M., Maingi, J., Marsh, S., Luna, G. 2000. A landscape approach for detecting and evaluating change in a semi-arid environment. *Environmental Monitoring and Assessment*. 64: 179-195.
- Koh, L., Wich, S. 2012. Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Tropical Conservation Science*. 5(2): 121-132.
- Leuschner, C. 2013. Vegetation and Ecosystem. *En: Vegetation Ecology*. Editores: Van der Maarel, E. and Franklin, J. University of Groningen, The Netherlands. Arizona State University, USA. Wiley-Blackwell. Pp: 285-307.
- Lite, S.J., Bagstad, K.J., Stromberg, J.C. 2005. Riparian plant species richness along lateral and longitudinal gradients of water stress and flood disturbance, San Pedro River, Arizona, USA. *Journal of Arid Environments*. 63: 785-813.
- Lite, S.J., Stromberg, J.C. 2005. Surface water and ground-water thresholds for maintaining *Populus-Salix* forests, San Pedro River, Arizona. *Biological Conservation*. 125: 153-167.
- Longley, P. A., M. F. Goodchild, D. J. Maguire y D. W. Rhind. 2005. Geographic information systems and science, Second Edition. John Wiley & Sons Ltd.
- López, M. 2001. Degradación de suelos en Sonora: el problema de la erosión en los suelos de uso ganadero. El Colegio de Sonora. *Región y Sociedad*. Vol. XIII. No. 22.
- López, M., Solís, G., Murrieta, J., López, R. 2010. Percepción de los ganaderos respecto a la sequía. Viabilidad de un manejo de los agostaderos que prevenga sus efectos negativos. *Estudios Sociales*. Número Especial. 221-241.
- Lutz, A. 2016. Human adaptation to social and environmental change in rural communities of the San Miguel watershed in arid Northwest Mexico. Dissertation. Doctor of philosophy. The University of Arizona.
- Malanson, G. 1993. Riparian landscapes. Cambridge University Press.
- Martínez, J. 2003. Acuíferos y agroquímicos en una región fronteriza: retos y oportunidades del TLCAN para la agricultura mexicana. Red Fronteriza de Salud y Ambiente, A.C. Universidad de Sonora. Segundo Simposio de Análisis Sobre los Efectos del Comercio en el Medio Ambiente.
- Martínez-Yrizar, A., Felger, R., Búrquez, A. 2010. Los ecosistemas terrestres: un diverso capital natural. *En: Diversidad Biológica de Sonora*. Editores: Molina, F., Van Devender, T. UNAM. CONABIO. Pp: 129-147.
- McGarigal, K. 2015. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Documentation. UMass Landscape Ecology Lab. Department of Environmental Conservation. University of Massachusetts. http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats_documents.html

- McLaughlin, S. P. 2004. Riparian Flora. *En: Baker, M.B. et al. (eds.), Riparian areas of the Southwestern United States Hydrology Ecology and Management.* CRC Press, Boca Raton, FL. Pp: 127-140.
- Méndez-Estrella, R., Romo-León, R., Castellanos, A., Gandarilla-Aizpuro, F., Hartfield, K. 2016. Analyzing Landscape Trends on Agriculture Introduced Exotic Grasslands and Riparian Ecosystems in Arid Regions of Mexico. *Remote Sensing.* 8(664).
- Méndez-Barroso, L., Vivoni, E., Watts, C., Rodríguez, J. 2009. Seasonal and interannual relations between precipitation, surface soil moisture and vegetation dynamics in the North American monsoon region. *Journal of Hydrology.* 377:59-70.
- Mendoza, M. 2014. Vegetación ribereña: indicador de la salud del río de la reserve de la biosfera de la barranca de Meztitlán. Tesis Doctorado en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados.
- Molina-Freaner, F., Markow, T., Pfeiler, E., Rojas-Soto, O., Varela-Romero, A., Quijada-Mascareñas, A., Esqueda, M., Yépiz-Plascencia, G. 2010. Diversidad genética de la biota. *En: Diversidad Biológica de Sonora.* Editores: Molina, F., Van Devender, T. UNAM. CONABIO. Pp: 97-128.
- Moreno, J., López, M. 2005. Desarrollo agrícola y uso de agroquímicos en el valle de Mexicali. *Estudios Fronterizos.* 6(12): 119-153.
- Moreno, J.L., Marañón, B., López, D. 2010. Los acuíferos sobreexplotados: origen, crisis y gestión social. *En: El agua en México: cauces y encauces.* Editores: Jiménez, B., Torregrosa, M., Aboites, L. Academia Mexicana de Ciencias. Comisión Nacional del Agua. Pp: 79-111.
- Mueller-Dombois, D., Ellenberg, H. 1974. *Aims and Methods of Vegetation Ecology.* John Wiley & Sons, Inc. Canada.
- Nabhan, G., Sheridan, T. 1977. Living fencerows of the Rio San Miguel, Sonora, Mexico: Traditional Technology for Floodplain Management. *Human Ecology.* 5(2): 97-111.
- Navarro-Navarro, A., Moreno-Vázquez, K., Scott, C. 2017. Social Networks for Management of Water Scarcity: Evidence from the San Miguel Watershed, Sonora, Mexico. *Water Alternatives.* 10(1): 41-64.
- Neyra, L., Durand, L. 1998. Biodiversidad. Parte II Recursos Naturales. La diversidad biológica de México: Estudio de país. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. Pp: 62-100.
- Nguyen, U., Glenn, E., Nagler, P., Scott, R. 2015. Long-term decrease in satellite vegetation indices in response to environmental variables in an iconic desert riparian ecosystem: The Upper San Pedro, Arizona, United States. *Ecohydrology.* 8: 610-625.
- Noriega, B.R. 2013. Repercusiones de la gran hidráulica en la cuenca del Río San Miguel de Horcasitas, Sonora, durante el siglo XX. Una primera aproximación a su estudio histórico-ambiental. Tesis Doctoral. Universidad de la Habana.

- Patten, D. 1998. Riparian Ecosystems of Semi-Arid North America: Diversity and Human Impacts. *Wetlands*. 18(4): 498-512.
- Pix4D. 2016. Pix 4Dmapper 3.1 User manual. Suiza.
- Poff, B., Koestner, K., Neary, D., Henderson, V. 2011. Threats to riparian ecosystems in western North America: an analysis of existing literature. *Journal of the American Water Resources Association*. 10-0076-P.
- Ramírez, E. 2010. Caracterización del ecosistema de ribera y su valor indicador del estado ecológico en la subcuenca valle de Bravo-Amanalco, estado de México. Tesis Maestría en Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Richardson, D., Holmes, P., Esler, K., Galatowitsch, Stromberg, J., Kirkamn, S., Pysek, P., Hobbs, R. Riparian vegetation: degradation, alien plant invasions, and restoration prospects. *Diversity and Distributions*. 13: 126-139.
- Romo-Leon, J.R., van Leeuwen, J.D., Castellanos-Villegas, A. 2014. Using remote sensing tools to assess land use transitions in unsustainable arid agro-ecosystems. *Journal of Arid Environments*. 106: 27-35.
- Romo-Leon, J.R., van Leeuwen Willem, J.D., Castellanos-Villegas, A. 2013. Percepción remota para el análisis de la distribución y cambios de uso de suelo en zonas áridas y semiáridas. Sección I Dinámica de uso y cobertura del suelo. *En: Dinámicas locales del cambio ambiental global*. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Pp: 17-48.
- Ruelas, C., Chávez, M., Barradas, V., Octaviano, A., García, L. 2010. Uso ecológico. *En: El agua en México: cauces y encauces*. Editores: Jiménez, B., Torregrosa, M., Aboites, L. Academia Mexicana de Ciencias. Comisión Nacional del Agua. Pp: 237-264.
- Salazar, A., Moreno, J., Lutz, A. 2012. Agricultura y manejo sustentable del acuífero de la Costa de Hermosillo. *Región y Sociedad*. Número especial 3: 155-179.
- Sánchez, S., Flores, A., Cruz-Leyva, I., Velázquez, A. 2009. Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. *En: Capital Natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO. México. Pp: 75-129.
- Saucedo, M. E., García E., Castellanos A., Flores J. 1997. La riqueza, una variable de respuesta de la vegetación a la introducción de zacate buffel. *Agrociencia*. 31: 83-90.
- Schiffman, R. 2014. Drones flying high as new tool for field biologists. *News and Analysis. Science*. 344.
- Schneider, S., Melzer, A. 2003. The Trophic Index of Macrophytes (TIM) – a New Tool for Indicating the Trophic State of Running Waters. *International Journal of Hydrobiology*. 88: 49-67.
- Scott, M. L., Nagler, P. L., Glenn, E. P., Valdes-Casillas, C., Erker, J. A., Reynolds, E. W., & Jones, C. L. 2009. Assessing the extent and diversity of riparian ecosystems in Sonora, Mexico. *Biodiversity and conservation*. 18(2): 247-269.
- Secretaría de Economía. 2016. Panorama Minero del Estado de Sonora. Servicio Geológico Mexicano. Secretaría de Economía. <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/SONORA.pdf>

- SEMARNAT. 2012. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y de desempeño ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. Gobierno Federal. http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf
- SEMARNAT. 2015. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Resumen Ejecutivo. México. Gobierno Federal. http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe15/tema/pdf/Resumen15_ejecutivo.pdf
- Secretaría de Economía. 2015. Panorama Minero del Estado de Sonora. Servicio Geológico Mexicano.
- Shreve, F., y I. L. Wiggins. 1964. Vegetation and Flora of the Sonoran Desert. Volume One. Stanford University Press, Stanford, California.
- Silveira, M., Aldana, L., Valenzuela, A., Ochoa, C., Jasa-Silveira, G., Camarena, B. 2016. Necesidades educacionales sobre riesgo de plaguicidas en el contexto socio-ambiental de las comunidades agrícolas de Sonora. *Nova Scientia*. 18(1): 371-401.
- Snyder, K., Williams, D. 2000. Water spurces used by riparian trees varies among stream types on the San Pedro River, Arizona. *Agricultural and Forest Meteorology*. 105: 227-240.
- Solís, G., Villalba, A., Nubes, G., del Castillo, J., Meraz, F. 2011. Físico-química del agua superficial y sedimento en el río Santa Cruz, Sonora, México. *Biotecnia*. Universidad de Sonora. 12(1): 3-9.
- Stromberg, J., Setaro, D., Gallo, E., Lohse, K., Meixner, T. 2017. Riparian vegetation of ephemeral streams. *Journal of Arid Environments*. 138: 27-37.
- Stromberg, J., Beauchamp, V., Dixon, M., Lite, S., Paradzick, C. 2007. Importance of low-flow and high-flow characteristics to restoration of riparian vegetation along rivers in arid south-western United States. *Freshwater Biology*. 52: 651-679.
- Stromberg, J., Briggs, M., Gourley, C., Scott, M., Shafroth, P., Stevens, L. 2004. Human Alterations of Riparian Ecosystems. En: Baker, M.B. et al. (eds.), Riparian areas of the Southwestern United States Hydrology Ecology and Management. CRC Press, Boca Raton, FL. Pp. 99-126.
- Stromberg, J. 1998. Dynamics of Fremont cottonwood (*Populus fremontii*) and saltcedar (*Tamarix chinensis*) populations along the San Pedro River, Arizona. *Journal of Arid Environments*. 40: 133-155.
- Stromberg, J., Tiller, R., Richter, B. 1996. Effects of groundwater decline on riparian vegetation of semiarid regions: The San Pedro, Arizona. *Ecological Applications*. 6(1): 113-131.
- Stromberg, J. 1993. Riparian mesquite forests: a review of their ecology, threats, and recovery potential. *Journal of the Arizona-Nevada Academy of Science*. 27(1): 111-124.

- Tamminga, A., hugenholts, C., Eaton, B., Lapointe, M. 2014. Hyperspectral remote sensing of channel reach morphology and hydraulic fish habitat using an unmanned aerial vehicle (UAV): a first assessment in the context of river research and management. *River Research and Applications*. DOI: 10.1002/rra.
- Temesgen H., Nyssen J., Zenebe A., Haregeweyn N., Kindu M., Lemenih M., Haile M. 2013. Ecological succession and land use changes in a lake retreat area (Main Ethiopian Rift Valley). *Journal of Arid Environments*. 91: 53-60.
- Triola, M. 2000. Estadística elemental. Séptima edición. Addison Wesley Longman. México.
- Trujillo, C. 2014. Interacciones bióticas y de nutrientes en el suelo de la vegetación ribereña y mezquital en el río San Miguel, Sonora. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora.
- Tso, B. y P. Mather. 2009. Classification Methods for Remotely Sensed Data, Second Edition. CRC Press.
- UNAM. 2016. Evidencias de las afectaciones a la integridad funcional de los ecosistemas del río Bacanuchi y el río Sonora por el derrame de la mina Buena Vista del Cobre: avances del diagnóstico ambiental. Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ustin, S., Smith, M., Adams, J. 1993. Remote Sensing of Ecological Processes: A Strategy for Developing and Testing Ecological Models Using Spectral Mixture Analysis. *En: Scaling Physiological Processes, Leaf to Globe*. Editores: Ehleringer, J., Field, C. Academic Press. Pp. 339-354.
- Valencia, J.C., Díaz, J.J., Vargas, L. 2004. La gestión integrada de los recursos hídricos en México: un nuevo paradigma en el manejo del agua. El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. SEMARNAT. INE. Pp. 213-258.
- Villarreal, M., Van Leeuwen, J.D., Romo-Leon, J.R. 2012. Mapping and monitoring riparian vegetation distribution, structure and composition with regression tree models and post-classification change metrics. *International Journal of Remote Sensing*. 33:13, 4266-4290.
- Villaseñor, J. 2007. Habitat use and the effects of disturbance on wintering birds using riparian habitats in Sonora, Mexico. Dissertation paper. Doctor in Philosophy. University of Montana.
- Van Devender, T., Felger, R., Fishbein, M., Molina-Freaner, F., Sánchez-Escalante, J., Reina-Guerrero, A. 2010. Biodiversidad de las plantas vasculares. *En: Diversidad Biológica de Sonora*. Editores: Molina, F., Van Devender, T. UNAM. CONABIO. Pp: 229-262.
- Vivoni, E. R., A. Rango, C. A. Anderson, N. A. Pierini, A. P. Schreiner-McGraw, S. Saripalli, and A. S. Laliberte. 2014. Ecohydrology with unmanned aerial vehicles. *Ecosphere* 5(10): 130.
- Volke, T., Velasco, J., de la Rosa, D. 2005. Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. México.

- Waring, R. How Ecophysiologicals Can Help Scale from Leaves to Landscapes. *En: Scaling Physiological Processes, Leaf to Globe*. Editores: Ehleringer, J., Field, C. Academic Press. Pp. 159-163.
- Webb, R., Leake, S. 2006. Ground-water surface-water interactions and long-term change in riverine riparian vegetation in the southwestern United States. *Journal of Hydrology*. 320: 302-323.
- White, J., Stromberg, J. 2011. Resilience, restoration, and riparian ecosystems: Case study of a dryland, urban river. *Restoration Ecology*. 19:1, 101-111.
- Whitehead, K., Hugenholtz, C. 2014. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. 2: 69-85.
- Xie, Y., Sha, Z., Yu, M. 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*. 1(1): 9-23.
- Yocupicio, T., Gómez, A. 1987. Estudio de la contaminación por metales pesados en el río Sonora y su afluente el río bacanuchi. Tesis Químico Biólogo. Universidad de Sonora.
- Zahawi, R., Dandois, J., Holl, K., Nadwodny, D., Leighton, J., Ellis, E. 2015. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biological Conservation*. 186: 287-295.
- Zaimas, G., M. Crimmins, D. Green, M. Nichols, A. Thwaites. 2007. Understanding Arizona's Riparian Areas. College of Agriculture and Life Sciences. University of Arizona.
- Zárate, J. L. 2012. Ganadería y recursos naturales en un área natural protegida del sur de Sonora. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 15: 187-197.
- Zimmerman, M. 1993. The Use of the Biotic Index as an Indicator of Water Quality. *En: Tested studies for laboratory teaching, Volume 5*. Editores: Goldman, C., Hauta, P., O'Donnell, M., Andrews, S., van der Heiden, R. Proceedings of the 5th Workshop/Conference of the Association for Biology Laboratory Education. Pp: 85-98.

X. APÉNDICES

Apéndice 1. Integración de datos para cada sitio, comparativa de vegetación ribereña (Río) y matorral desértico (Mat). Los encabezados con asterisco (*) indican que los datos corresponden al estrato arbóreo y arbustivo.

Sitio	Diversidad (índice Shannon- Wiener)*		Actividad fotosintética				Riqueza*		Perturbación de los sitios ribereños
	Río	Mat	Río		Matorral		Río	Mat	
			Mayo	Sept	Mayo	Sept			
Rancho Aguilar	1.58	1.65	0.406	0.434	0.144	0.412	8	11	11
Ciénega	0.49	1.13	0.569	0.542	0.249	0.384	4	9	12
Cercos Vivos	1.87	1.82	0.33	0.398	0.137	0.377	13	11	12
El Cajón	1.85	1.71	0.42	0.41	0.139	0.318	11	7	16
Nogalera	1.35	1.91	0.193	0.363	0.167	0.338	12	14	15
La Galera	1.93	0.95	0.359	0.493	0.168	0.368	11	7	11
Rancho San Juan	1.8		0.326	0.453			11		10
Rancho Tomás	0.59	1.03	0.388	0.436	0.256	0.381	3	11	10

Apéndice 2. Listado florístico de especies arbustivas y arbóreas registradas en los sitios de estudio.

Especie	Familia
<i>Acacia cochliacantha</i> Humb. & Bonpl. Ex Willd.	Fabaceae
<i>Acacia constricta</i> Benth.	Fabaceae
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.	Fabaceae
<i>Acacia greggi</i> A. Gray	Fabaceae
<i>Amaranthus palmeri</i> S. Wats.	Amaranthaceae
<i>Ambrosia confertiflora</i> Dc.	Asteraceae
<i>Baccharis salicifolia</i> (Ruiz & Pav.) Pers.	Asteraceae
<i>Bursera fagaroides</i> (Kunth) Engl.	Burseraceae
<i>Capsicum annuum</i> L.	Solanaceae
<i>Celtis pallida</i> Torr.	Cannabaceae
<i>Celtis reticulata</i> Torr.	Cannabaceae
<i>Cocculus diversifolius</i> Dc.	Menispermaceae
<i>Cylindropuntia leptocaulis</i> (DC.) Knuth	Cactaceae
<i>Cylindropuntia thurberi</i> (Engelm.) F.M. Knuth in Backeb. & F.M. Knuth	Cactaceae
<i>Cylindropuntia versicolor</i> (Engelm. Ex J. M. Coult.) Knuth	Cactaceae
<i>Fraxinus velutina</i> Torr.	Oleaceae
<i>Guaiacum coulteri</i> A. Gray	Zygophyllaceae
<i>Hymenoclea monogyra</i> (Torr. & A. Gray) Strother & B.G. Baldwin	Asteraceae
<i>Jacquinia pungens</i> Donn. Sm.	Theophrastaceae
<i>Jatropha cardiophylla</i> (Torr.) Müll.Arg.	Euphorbiaceae
<i>Lophocereus schottii</i> (Ngelm.) D.R. Hunt	Cactaceae
<i>Lycium berlandieri</i> Dunal	Solanaceae
<i>Melia azedarach</i> L.	Meliaceae
<i>Mimosa laxiflora</i> Benth.	Fabaceae
<i>Nicotiana glauca</i> Graham	Solanaceae
<i>Olneya tesota</i> A. Gray	Fabaceae
<i>Parkinsonia aculeata</i> L.	Fabaceae
<i>Parkinsonia florida</i> (Benth. Ex A. Gray) S. Wats.	Fabaceae
<i>Parkinsonia praecox</i> (Ruiz & Pav.) J.A. Hawkins	Fabaceae
<i>Phaulothamnus spinescens</i> A. Gray	Achatocarpaceae
<i>Populus fremontii</i> S. Wats.	Salicaceae
<i>Prosopis velutina</i> Wooton	Fabaceae

<i>Ricinus communis</i> L.	Euphorbiaceae
<i>Salix gooddingii</i> Ball	Salicaceae
<i>Stegnosperma halimifolium</i> Benth	Stegnospermataceae
<i>Stenocereus thurberi</i> (Engelm.) Buxbaum	Cactaceae
<i>Vallesia glabra</i> Link	Apocynaceae
<i>Xanthium strumarium</i> L.	Asteraceae
<i>Ziziphus obtusifolia</i> (Hook ex. Torr & A. Gray) A. Gray	Rhamnaceae
Sp 01	
Sp 02	
Sp 03	
Sp 04	
Sp 05	
Sp 06	
Sp 07	
Sp 08	
Sp 09	
Sp 10	
Sp 11	
Sp 12	
Sp 13	
Sp 14	
Sp 15	
Sp 16	
Sp 17	
Sp 18	
Sp 19	
Sp 20	
Sp 21	
Sp 22	

XI. ANEXO FOTOGRÁFICO



El Cajón en abril (arriba) y en agosto (abajo), municipio de San Miguel de Horcasitas. Mezquital ribereño.



Rancho San Juan, municipio de Opodepe



Cercos Vivos, municipio de Cucurpe.



Cercos Vivos, municipio de Cucurpe. Vegetación ribereña bajo manejo.



La Ciénega, municipio de Cucurpe. Vegetación ribereña dominada por fresnos.



La Galera, municipio de Rayón. Milpa, vegetación ribereña y matorral desértico en las colinas.



Nogalera, municipio de San Miguel de Horcasitas. Lecho del río seco.



Rancho Aguilar, municipio de Rayón. Vegetación ribereña.



Rancho Tomás, municipio de Opodepe. Vista panorámica en la que se observa el río con mezquital ribereño y vegetación ribereña, praderas de pastoreo y matorral desértico en las colinas.



Ortomosaico de río, Cercos Vivos, municipio de Cucurpe.