



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

## DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

### DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

#### **“FOTOINTERPRETACIÓN SATELITAL DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LAS MÁRGENES DEL RÍO SONORA, EN EL TRAMO URES-MOLINO DE CAMOU Y EL EFECTO SOCIAL DERIVADO DE LA ACTIVIDAD ANTRÓPICA REGIONAL”**

#### **TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**GEÓLOGO**

PRESENTA:

**DURAZO GÁLVEZ FRANCISCO MARTÍN**

DIRECTORA:

**M.C GUTIÉRREZ ANGUAMEA GRISEL ALEJANDRA**



Hermosillo, Sonora, 30 de junio, 2020

# 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

FOTOINTERPRETACIÓN SATELITAL DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LAS  
MÁRGENES DEL RÍO SONORA, EN EL TRAMO URES MOLINO DE CAMOU Y EL  
EFECTO SOCIAL DERIVADO DE LA ACTIVIDAD ANTRÓPICA REGIONAL

TESIS

Que para obtener el grado de:

GEÓLOGO

Presenta:

DURAZO GÁLVEZ FRANCISCO MARTÍN

Hermosillo, Sonora, México.

30 de junio de 2020



## **DEDICATORIA**

*A mi madre Rosa Isela Gálvez Ramírez, que me acompaña desde el cielo, sé que estarías orgullosa de saber que he terminado esta etapa, Gracias infinitas.*

*A la comunidad de Tzajalchen, Chiapas en donde aprendí a amar y respetar a la Madre Tierra, a través de la cultura Tzotzil, les recuerdo con mucho cariño.*

*A mis amigos y amigas.*

*A los habitantes del río Sonora, mi solidaridad y respeto ...*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco en primer lugar a Dios Padre-Madre que me ha acompañado y que se hace tangible en los demás, mostrándome su amor y misericordia en cada persona.

Durante este tiempo de preparación profesional y elaboración de este documento, han participado de manera parcial, directa e indirecta, muchas personas a las cuales nombro con mucho cariño y respeto. Por el limitado espacio, no podré nombrar a todos, pero los llevo en mi corazón y mente.

Agradezco a mi directora de tesis la M.C Grisel Alejandra Gutiérrez Anguamea, por aceptarme como tesista, por sus enseñanzas en clases, por sus comentarios y observaciones que permitieron cumplir con los objetivos del trabajo; y por el apoyo y orientación durante el proceso.

Gracias al Dr. Rolando Díaz Caravantes por su amistad y darme la oportunidad de colaborar con él, en El Colegio de Sonora, por sus enseñanzas profesionales, una oportunidad única; Así como sus orientaciones y consejos personales. Y por permitirme utilizar esta información para la elaboración de este trabajo.

A mis lectores: al M.C José Ismael Minjarez Sosa, Gracias por participar en la revisión del documento, por sus comentarios y propuesta de línea de investigación acertada. A la Dra. Elia María Tapia Villaseñor, Gracias por su enseñanza en el aula, por transmitir el conocimiento, por la paciente revisión a este trabajo y por sus comentarios que ayudaron a mejorar.

Al ecólogo Juan Haro, por la recolección de datos en campo. A mis profesores y profesoras que han compartido su conocimiento y experiencia en el aula de clases, Gracias por las enseñanzas y las experiencias de campo compartidas.

Gracias a mi comunidad de CVX Kino, por ser parte del proceso, por estar animando espiritualmente y acompañando en diferentes momentos de penas y alegrías. Muchas Gracias: Pablo Enríquez, Yadira Aguirre, Rolando Díaz, Iván de Santiago Armenta, Melina González, Noelia Martínez, Miriam Padilla, Kadiya del Carmen Calderón.

A mi familia Gálvez, por ser parte de este proyecto, a mi abuelo Francisco Gálvez, mi hermana Daniela Paloma, mi sobrina Romina Isabella, a mis tíos Chacho y Mirinda, y a mi compañera Celeste Sagaste.

A mis familiares que se han adelantado, que me acompañan desde el cielo, a mí tío Chino Durazo, a mi abuela Irma Ramírez y a mi prima Angelita Milagros.

Un agradecimiento especial a mis amigos de trabajo: Fernanda Elizalde Castillo y Pablo Escoboza Castillo, por las aventuras compartidas y viajes de campo durante estos cinco años, Gracias.

A mis amigos y amigas que conocí durante la carrera de Geología: Telma Guadalupe, Mauricio Córdova, Jesús Preciado (El Vaquero), Iván Vázquez Francisco Salazar (Kino), Carlos Vélez, Benito Bacame, Fernanda Norzagaray. Gracias por las experiencias compartidas durante este tiempo, espero sigamos compartiendo la vida.

*“Las iniciativas ecologistas pueden terminar encerradas en la misma lógica de la globalización: buscar sólo un remedio técnico a cada problema ambiental que surja es aislar cosas que en la realidad están entrelazadas, y esconder los verdaderos y más profundos problemas del sistema mundial”. -Laudato Si-*

*“Hoy gritan las aguas, los bosques, los animales, es toda la Tierra la que grita. Dentro de la opción por los pobres y contra la pobreza debe ser incluida la Tierra y todos los ecosistemas. La Tierra es el gran pobre que debe ser liberado junto a sus hijos”. -Leonardo Boff-*

## Índice

Índice de Gráficas .....	i
Índice de Tablas .....	ii
Índice de Mapas .....	iii
Índice de Ilustraciones .....	iv
Índice de Fotografía .....	v
Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	4
1.1 Características de la cuenca del Río Sonora .....	4
1.1.1 Hidrología .....	5
1.1.2 Características geológicas de la cuenca del Río Sonora.....	7
1.2 Geología.....	8
1.2.1 Rocas sedimentarias .....	8
1.2.2 Rocas intrusivas.....	8
1.2.3 Metamorfismo de contacto.....	9
1.3 Uso del suelo y vegetación en la cuenca del Río Sonora .....	11
1.3.1 Flora.....	12
1.4 Contexto regional .....	12
1.4.1 Economía regional.....	13
1.4.2 Sector primario .....	14
1.4.3 Sector secundario.....	14
1.4.4 Sector terciario .....	15



1.5 Característica social.....	15
1.5.1 Ures.....	15
1.5.2 Molino de Camou.....	16
1.6 Antecedentes de actividades antrópicas .....	16
1.6.1 Agricultura .....	16
1.6.2 Ganadería .....	20
1.6.3 Minería.....	22
1.7 Variables climatológicas.....	26
1.7.1 Precipitación.....	26
1.7.2 Temperatura .....	30
1.8 Percepción remota.....	32
1.8.1 Firma espectral .....	34
1.8.2 Aplicación de la percepción remota para análisis de suelos .....	38
1.8.3 Cambio de uso de suelo .....	39
2. Hipótesis.....	40
3. Objetivos.....	40
3.1 Objetivo general .....	40
3.2 Objetivo específicos .....	40
4. Metodología.....	41
4.1 Área de estudio.....	42

4.2 Ubicación de sitios mediante SIG .....	44
4.3 Obtención de imágenes satelitales .....	45
4.4 NDVI .....	47
4.5 Toma de datos en campo .....	49
4.6 Preclasificación .....	51
4.6.1 Corrección atmosférica .....	51
4.6.2 Pansharpening .....	52
4.6.3 Separabilidad espectral .....	54
4.7 Clasificación supervisada .....	55
4.7.1 Maximum likelihood .....	56
4.8 Posclasificación.....	56
4.8.1 Coeficiente de concordancia (K).....	56
4.8.2 Matriz de confusión.....	57
4.9 Evaluación de cambio de cobertura de suelo.....	59
4.10 Matriz de transición.....	60
4.11 Indicadores para identificar los efectos sociales por el cambio de cobertura de suelo .	62
5. Resultados.....	63
5.1 Evaluación de cambio de cobertura de suelo.....	63
5.1.1 Evaluación de cambio de Agricultura.....	63
5.1.2 Evaluación de cambio de Vegetación ribereña .....	65

5.1.3 Evaluación de cambio de Mezquital.....	68
5.2 Análisis de píxel.....	70
5.3 Efectos sociales en el cambio de uso de suelo en la región del Río Sonora.....	71
5.4 Mapas resultantes .....	74
6. Discusión .....	78
7. Conclusiones.....	81
Referencias bibliográficas .....	84
Anexo .....	97
Anexo Fotográfico.....	102

## Índice de Gráficas

<b>Gráfica 1.</b> Superficie sembrada y cosechada en Sonora; Fuente SADER, 2019.....	17
<b>Gráfica 2.</b> Volumen de producción ganadera y agrícola: 2000-2018; Fuente: SADER, 2019.	18
<b>Gráfica 3.</b> Volumen de producción agrícola por municipio; Fuente: SADER, 2019. ....	20
<b>Gráfica 4.</b> Precipitación anual 1990 a 2018; Fuente: CONAGUA, 2018. ....	29
<b>Gráfica 5.</b> Temperatura máxima 1990-2018; Fuente: CONAGUA, 2018. ....	30
<b>Gráfica 6.</b> Temperatura mínima: 1990 a 2018; Fuente: CONAGUA, 2018. ....	31
<b>Gráfica 7.</b> Temperatura mínima 1990-2018; Fuente; CONAGUA, 2018.....	32
<b>Gráfica 8.</b> Extensión del terreno por clase en cada periodo de clasificación. ....	60
<b>Gráfica 9.</b> Conservación de cada cobertura para cada periodo evaluado.....	62
<b>Gráfica 10.</b> Incremento de la Agricultura por cada periodo.....	64
<b>Gráfica 11.</b> Decremento de Agricultura para los diferentes periodos.....	65
<b>Gráfica 12.</b> Decremento de Vegetación ribereña por periodo clasificado. ....	66
<b>Gráfica 13.</b> Incremento de Vegetación ribereña por periodo clasificado.....	67
<b>Gráfica 14.</b> Incremento de Mezquital por periodo clasificado. ....	68
<b>Gráfica 15.</b> Decremento de Mezquital. ....	69
<b>Gráfica 16.</b> Comportamiento de píxel en Molino de Camou. ....	70
<b>Gráfica 17.</b> Comportamiento de píxel en Ures. ....	70
<b>Gráfica 18.</b> PIB Estatal y Agropecuario: 2010-2016; Fuente: SADER.....	72

<b>Gráfica 19.</b> Población de la región del Río Sonora; Fuente: INEGI, 2016.....	73
--	----

### Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Uso de suelo y vegetación; Fuente: INEGI 2012.....	11
<b>Tabla 2.</b> Proyección poblacional; Fuente: CONAPO, 2015b.....	12
<b>Tabla 3.</b> Total de habitantes por cada municipio 2010-2015; Fuente: INEGI .....	13
<b>Tabla 4.</b> Contexto regional; Fuente: INEGI, 2016.....	14
<b>Tabla 5.</b> Hectáreas de agricultura por municipio; Fuente: SADER, 2018 .....	19
<b>Tabla 6.</b> Volumen de producción ganadera del estado de Sonora; Fuente: SADER, 2019. ...	21
<b>Tabla 7.</b> Unidades mineras cuenca Río Sonora; Fuente: SGM, 2018.....	22
<b>Tabla 8.</b> Estaciones climatológicas; Fuente: CONAGUA, 2018.....	26
<b>Tabla 9.</b> Precipitaciones: 1990-2018; Fuente: CONAGUA, 2018. ....	28
<b>Tabla 10.</b> Rangos de espectro electromagnético; Fuente: Leonberger, 2002.....	35
<b>Tabla 11.</b> Fechas de adquisición de imágenes Landsat y Sentinel. ....	45
<b>Tabla 12.</b> Características de satélites utilizados; Fuente: USGS, 2019.....	46
<b>Tabla 13.</b> Levantamiento en campo 2016. ....	49
<b>Tabla 14.</b> Criterio para clasificación de clase; Fuente: Anderson et al., 1976. ....	50
<b>Tabla 15.</b> Análisis de separabilidad espectral de las coberturas a clasificar. ....	55
<b>Tabla 16.</b> Abreviatura de clase. ....	58

<b>Tabla 17.</b> Valores de porcentaje del Productor (PP) y Usuario (PU). .....	58
<b>Tabla 18.</b> Matriz de transición global de cobertura: 2010-2018.....	61
<b>Tabla 19.</b> Familias con más de 40 especies y más de 20 géneros; Fuente: Cornejo-Denman, 2017.....	97
<b>Tabla 20.</b> Familias con más de 40 especies y más de 20 géneros; Fuente: Cornejo-Denman, 2017.....	98
<b>Tabla 21.</b> Flora Sonorense con algún grado de protección, NOM-059-2010; Fuente: SEMARNAT, 2010.....	99
<b>Tabla 22.</b> Matriz de cambio 2010-2014 .....	100
<b>Tabla 23.</b> Matriz de cambio 2014-2016.....	100
<b>Tabla 24.</b> Matriz de cambio 2014-2018.....	101
<b>Tabla 25.</b> Matriz de cambio 2010-2018.....	101

### Índice de Mapas

<b>Mapa 1.</b> Subcuencas pertenecientes a la cuenca Río Sonora; Fuente: CONAGUA.....	6
<b>Mapa 2.</b> Geología del área de estudio; Fuente: SGM.....	10
<b>Mapa 3.</b> Unidades mineras; Fuente: SGM, 2018.....	25
<i>Mapa 4. Unidades mineras; Fuente: SGM, 2018.....</i>	25
<b>Mapa 5.</b> NDVI: Región Río Sonora; Elaboración propia.....	48
<b>Mapa 6.</b> Transición de cobertura: región Río Sonora; Elaboración propia.....	71

<b>Mapa 7.</b> Clasificación de cobertura vegetal en la región Río Sonora: Ures-Molino de Camou 2010. ....	74
<b>Mapa 8.</b> Clasificación de cobertura vegetal en la región del Río Sonora: Ures-Molino de Camou, 2014. ....	75
<b>Mapa 9.</b> Clasificación de cobertura vegetal en la región del Río Sonora: Ures-Molino de Camou, 2018. ....	76
<b>Mapa 10.</b> Resultado de clasificación del área de estudio por año evaluado. ....	77

### **Índice de Ilustraciones**

<b>Ilustración 1.</b> Rango de ondas de luz; Fuente NASA. ....	36
<b>Ilustración 2.</b> Curvas espectrales teóricas para diferentes coberturas terrestres; Fuente: NASA. ....	37
<b>Ilustración 3.</b> Etapas del proceso para la clasificación. ....	41
<b>Ilustración 4.</b> Sitios seleccionados; Fuente: Google Earth, 2016. ....	44
<b>Ilustración 5.</b> NDVI; Fuente: Martínez-Barbáchano y Solís-Miranda, 2018. ....	47
<b>Ilustración 6.</b> Comparación de imagen aplicando la corrección atmosférica; Fuente: Landsat OLI 8, agosto 2014. ....	52
<b>Ilustración 7.</b> Comparación de resolución espacial; Fuente: Landsat OLI 8, agosto 2014. ...	53
<b>Ilustración 8.</b> Representación de la separabilidad espectral analizada de la imagen 2016; mediante ENVI. ....	54

## Índice de Fotografía

<b>Fotografía 1.</b> Ures, área de cultivo. ....	102
<b>Fotografía 2.</b> Vegetación ribereña, cauce Río Sonora. ....	102
<b>Fotografía 3.</b> Álamos secos se contaron 189 de los cuales 185 se encontraban es estas condiciones. Ures. ....	103
<b>Fotografía 4.</b> Levantamiento de datos.....	103
<b>Fotografía 5.</b> Matorral desértico y especie de bovino muerta.....	104



## **Introducción**

Los cambios en la cobertura de suelo a nivel mundial se han registrado de manera acelerada en las últimas décadas (García-Romero et al., 2010; Lambin, 2003). Estos cambios pueden ser provocados por distintos factores como el incremento de actividades económicas o alteraciones climáticas, que en consecuencia pueden provocar afectaciones en distintos niveles de los diferentes ecosistemas, sin embargo, los ecosistemas ribereños (asociados a corrientes de agua) han sido poco estudiados, (Cornejo-Denman, 2017; Tucker et al., 1985).

Las principales actividades humanas que alteran los ecosistemas ribereños incluyen el desvío de agua para almacenamiento, la agricultura, la ganadería, la construcción de caminos, la urbanización, la industria minera, la sobreexplotación de acuíferos. (Goodrich et al., 2000; Kepner et al., 2000; Zaimes et al., 2007).

El estado de Sonora a pesar de ser desértico presenta una gran diversidad de ecosistemas, debido a su ubicación geográfica y extensión territorial. Esta diversidad alberga distintos tipos de flora como los matorrales, bosques, vegetación costera, pastizales entre otros. Estos ecosistemas han sido estudiados en investigaciones previas y desde diferentes enfoques, como lo es la característica de la biodiversidad, estructuras de la vegetación y la evolución del impacto de las actividades humanas (Martínez-Yrizar et al., 2010).

La escasa precipitación en el estado de Sonora y el aumento en la demanda de agua de sus distintas comunidades se ha reflejado en una excesiva extracción de agua subterránea. La intrusión salina es una de las consecuencias de la sobreexplotación acuífera (Vega-Granillo et al., 2011), como es el caso de la Costa de Hermosillo, que ha ocasionado el abandono de campos agrícolas, propiciando procesos de desertificación y degradación del suelo; así como la modificación del paisaje (Romo-León et al., 2014)

Los centros agrícolas más importantes del estado de Sonora, por su extensión y producción están ubicados en la Costa de Hermosillo, al sur en el Valle del río Yaqui y el Valle del río Mayo. Otras regiones agrícolas relevantes, pero de menor extensión, se encuentran a lo largo de las riberas de los ríos Asunción, Sonora y San Miguel (Cornejo-Denman, 2017). La modificación de la cobertura vegetal nativa en estas regiones es consecuencia de la ganadería extensiva (Zárate, 2012) y la

introducción de especies exóticas como el zacate buffel utilizado para el pastoreo (Arriaga et al., 2004). Se ha estudiado poco de los efectos y modificaciones en los ecosistemas ribereños del estado de Sonora.

Existen pocos estudios que han analizado el cambio de cobertura de suelo para la región de Sonora, sobre todo en la cuenca del Río Sonora. Estos estudios han utilizado las técnicas de percepción remota para poder evaluar el comportamiento y evolución de la cobertura.

Kepner y colaboradores (2000) registraron los cambios de cobertura de suelo que se presentaron en la cuenca del Río San Pedro, por medio de la aplicación de percepción remota. Como resultados de la investigación, detectaron que los mezquiales tienen una fuerte interacción de cambios de cobertura con los sitios de pastizal y matorral desértico. De igual forma, reportan una reducción de la vegetación ribereña entre los años 1973 y 1992. Los autores interpretan un posible incremento en la vulnerabilidad de la población y del sistema natural del sitio.

Por otra parte Cornejo-Denman (2017) realizó un análisis de la estructura, composición y función de la vegetación ribereña de zonas áridas, y su relación con los principales usos del suelo en Sonora, en la subcuenca río San Miguel; para ello utilizó imágenes de alta resolución obtenidas por drones e imágenes de resolución moderada de Landsat 8 OLI (Operational Land Imager).

En dicho análisis, Cornejo concluyó que el aumento de las actividades humanas asociadas al cambio de uso de suelo aumenta la perturbación en los ecosistemas ribereños del río San Miguel. Identificó también que 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, como la agricultura y las actividades recreativas, con mayor intensidad que en el resto de los lugares. El uso de plataformas aéreas (drones) permite el análisis detallado de la vegetación y facilita la descripción desde una perspectiva paisajística.

Bustamante-Icedo (2016) realizó una investigación sobre los efectos de factores ambientales y uso de suelo en la fenología de tres áreas prioritarias (Cañada Mazocahui, Sierra Libre y Sierra Seri) para la conservación en el noroeste de México, utilizando imágenes satelitales para determinar el cambio de uso de suelo. En el cual concluye que de 1993 a 2011 la Cañada Mazocahui y Sierra Seri la consideran como áreas conservadas en términos de cambios de cobertura de suelo, donde

las actividades antrópicas que se desarrollan en ellas no han provocado cambios considerables. Caso contrario sucede en a Sierra Libre, donde la introducción de forraje para pastoreo sigue ocasionando cambios a diferentes escalas.

Gandarilla-Aizpuro (2015) documento la evolución de la dinámica de cambio de cobertura de suelo en las subcuencas Río San Miguel y Río Zanjón. Concluyendo que el desarrollo de las actividades económicas asociadas a la agricultura y ganadería implican la explotación intensiva de recursos naturales, principalmente de suelo y agua, afectando la disponibilidad de estos para la vegetación natural. Destaca que el uso de la percepción remota permite realizar estimaciones de la dinámica de cambios.

En ese contexto, la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha sido útil para identificar y cuantificar los impactos ocasionados por la actividad humana, por medio de la facilidad de acceso y manipulación de grandes cantidades de información (bases de datos, vectores y ráster). La interpretación del paisaje, con el apoyo de imágenes satelitales obtenidas en distintas épocas, permite realizar, actualmente, un análisis espacio-temporal de las condiciones reflejadas en el terreno, derivadas del funcionamiento ecológico del sitio de estudio.

Esta investigación pretende aplicar las técnicas de percepción remota, para analizar el cambio de cobertura de suelo en la región de Ures-Molino de Camou, y los efectos sociales derivados del cambio de cobertura. El área de estudio pertenece a la cuenca Río Sonora, se definió esta zona debido a que su principal economía gira en torno a la agricultura, la ganadería y la minería, tres actividades con un alto impacto en el cambio de uso de suelo.

En las últimas décadas ha tomado importancia la influencia que tiene las actividades antrópicas en el comportamiento del paisaje, influyentes en el cambio local, regional y global (Feddemá et al., 2005). A pesar de la importancia que ha tomado este tema, es indudable la gran falta de estudios relacionados con los ecosistemas ribereños en Sonora (Mott-Lacroix et al., 2017). Esto es preocupante ya que los ecosistemas ribereños en el estado son de vital importancia social, económica y ambiental (Granados-Sánchez et al., 2006).

El análisis del cambio de uso de suelo o de la cubierta vegetal en una zona determinada es de suma importancia en la investigación ambiental. Dicho análisis ambiental permite evaluar el

comportamiento en espacio y tiempo de las actividades climatológicas y antropogénicas, incluidas las de índole industrial para poder evaluar y analizar los efectos ambientales y sociales derivados de la modificación del paisaje.

## **1. Antecedentes**

### **1.1 Características de la cuenca del Río Sonora**

La cuenca alta del Río Sonora se extiende desde el suroeste de los Estados Unidos de Norteamérica hasta el noroeste de México; en ella se encuentra ubicada Cananea, una región con vocación minera desde hace 300 años, considerada uno de los más grandes yacimientos minerales de cobre del mundo (Rangel-Medina, 2019).

La cuenca colinda por el norte con la del río San Pedro, que se origina en el territorio mexicano y fluye hacia el norte, pasando por las inmediaciones de Benson, Arizona (Estados Unidos); en el norte y oriente limita con las cuencas de los ríos Bavispe y Moctezuma, afluentes del río Yaqui; al sur oriente con el río Mátape y el arroyo de La Bandera; al norponiente con la cuenca del río Asunción y al surponiente con la del río Bacoachi.

Tiene una extensión aproximada de 30,913 km<sup>2</sup> y comprende las subcuencas La Colorada, La Bandera, El Bajío, El Cajoncito y Río Sonora Alto. La cuenca Bacoachi cubre una superficie aproximada de 7,869 km<sup>2</sup> y está conformada por las subcuencas La Manga, la laguna San Bartolo, el Río Sonora Bajo, El Carrizal y el arroyo El Carrizo.

Asimismo, el área de estudio cuenta con una extensión de 3,560 km<sup>2</sup>, y el límite para realizar la clasificación comprende las localidades ubicadas desde Ures hasta Molino de Camou, con una distancia en línea recta de 40 km. Se encuentra en las coordenadas geográficas 29°28'10" y 29°6'44" Norte y 111°0'0" y 110°16'50" Oeste. En las dos localidades hay presencia de la agricultura y la ganadería, y el área de cultivo se halla en las riberas del río.

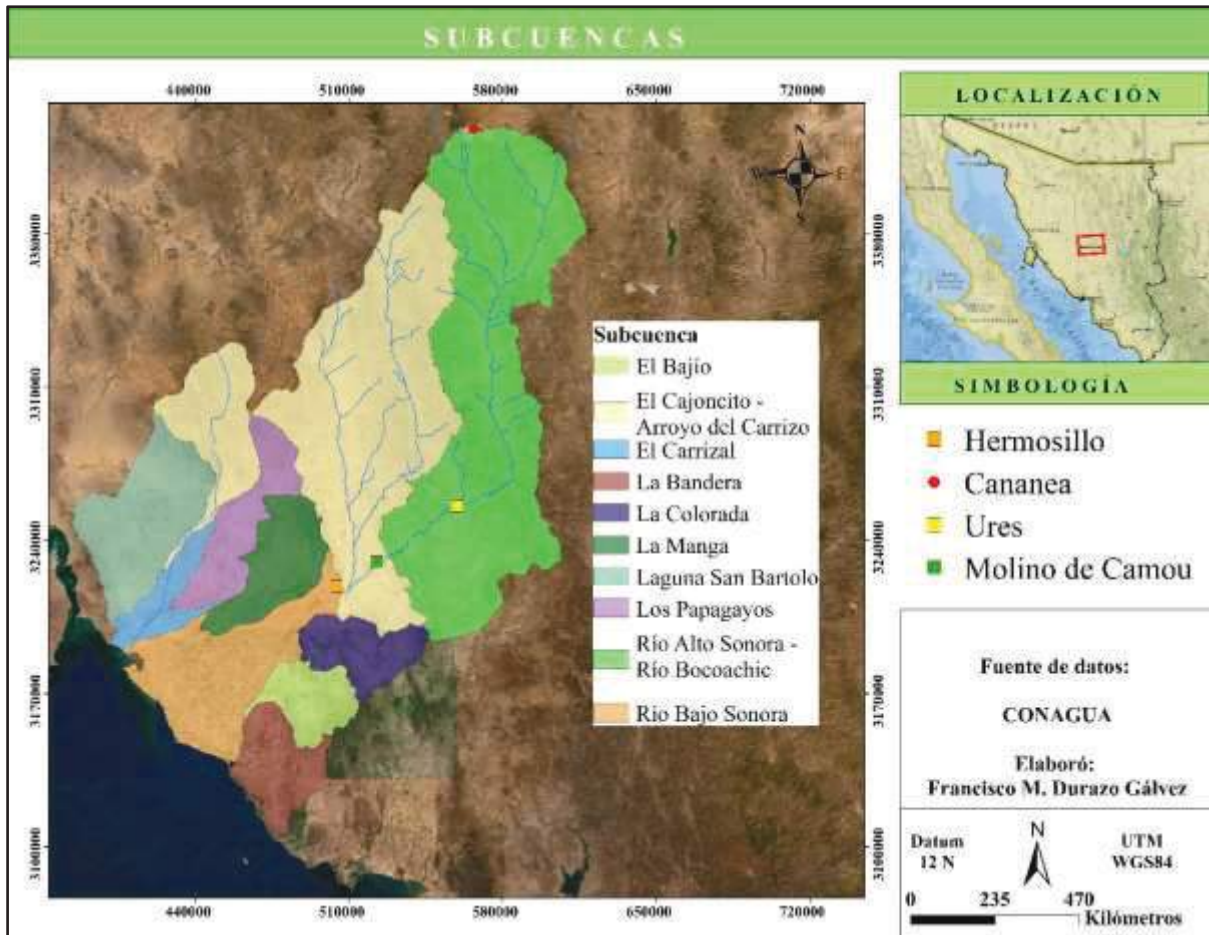
### 1.1.1 Hidrología

El Río Sonora tiene sus orígenes en el parteaguas con el río Bavispe en la Sierra Magallanes, 5 km al oriente de Cananea. En la cuenca alta, su trayectoria general es hacia el sur, donde recibe como único afluente importante al río Bacanuchi, que se origina en el parteaguas con el arroyo Cocóspera de la cuenca del río Magdalena, con una elevación de 2,480 m s. n. m. (metros sobre el nivel del mar) (CONAGUA, 2015).

Este río ocupa el tercer lugar en la región en cuanto a extensión de cuenca y magnitud de aportaciones, las cuales se almacenan en las presas Rodolfo Félix Valdés y Abelardo L. Rodríguez, con una capacidad de 130 hm<sup>3</sup> y 219.5 hm<sup>3</sup>, respectivamente. En el Mapa 1 se pueden ver las subcuencas que pertenecen a la cuenca del Río Sonora y la distribución hidrográfica.

Igualmente, el Río Sonora se encuentra ubicado entre las coordenadas geográficas 29°4'37" y 31°1'15" de latitud Norte y 110°53'88" y 110°21'21" de longitud Oeste, y pertenece a la Región Hidrológica número nueve (RH9). La topografía de la cuenca es de forma irregular y accidentada, un aspecto típico de áreas montañosas, y las elevaciones en este lugar varían de los 40 a 2,620 m.s.n.m.

A la altura de la presa Abelardo L. Rodríguez se une el río Sonora y el río San Miguel, afluente de mayor extensión, por el margen derecho, cuya cuenca tiene un área aproximada de 8,427 km<sup>2</sup>. El río San Miguel se origina en el parteaguas con el arroyo Cocóspera, en la Sierra Azul, con una elevación de 1 200 m s. n. m., y su recorrido es hacia el sur; así, recibe por su margen derecha al río Zanjón, a la altura de la localidad de Zamora, aproximadamente 22 km antes de unirse al Río Sonora y la presa mencionada.



**Mapa 1.** Subcuencas pertenecientes a la cuenca Río Sonora; Fuente: CONAGUA.

La longitud del cauce principal del Río Sonora es de 286.35 km, con una pendiente de 0.00459. La elevación máxima del cauce es de 1.603 km, en promedio, mientras la elevación mínima corresponde a 0.286 km. Estos datos permiten calcular el tiempo de concentración aplicando la fórmula de Kirpich (Wanielista et al., 1997), lo que da como resultado 41.03 horas. Este dato representa el tiempo de concentración del flujo de agua a la presa El Molinito, un resultado que corresponde a la cuenca del Río Sonora.

Para el área de interés se tiene que la longitud del cauce del Río Sonora, de Ures al Molino de Camou, es de 93.47 km, con una pendiente de 0.0034701. La elevación máxima del cauce es de aproximadamente 0.55 km, y la mínima de 0.226 km. De acuerdo con la fórmula de Kirpich (1940), se obtiene un tiempo de concentración de 19.3 horas, ese es el tiempo en que tarda el flujo de agua en llegar de Ures al Molino de Camou.

### 1.1.2 Características geológicas de la cuenca del Río Sonora

La cuenca alta del Río Sonora es rica en yacimientos de minerales, y la principal explotación se localiza cerca de su origen, en la zona de Cananea, donde se extrae sobre todo cobre; los yacimientos se prolongan hacia el sur a lo largo de la sierra El Manzanal, que divide al Río Sonora de su afluente, el río Bacanuchi, en donde existen yacimientos de oro, plata, cobre y zinc, por ambos márgenes del río Bacanuchi (Gómez-Álvarez et al., 1990).

A su vez, la cuenca del río es delimitada al Este y al Oeste por elevaciones montañosas de rocas sedimentarias, volcánicas y plutónicas que albergan yacimientos minerales (pórfidos cupríferos, vetas, skarns y sistemas epitermales), estos últimos se han explotado en diferentes épocas para la obtención de Cu (cobre), Mo (molibdeno), W (wolframio), Pb (plomo), Zn (zinc), Au (oro) y Ag (plata) (González-León et al., 2010).

En la parte Norte de la cuenca se localiza Cananea, un complejo de pórfidos cupríferos (Bushnell-Ensign, 1988). Este comprende el depósito Buenavista del Cobre, que contiene 7,140 millones de toneladas de mineral con una ley de Cu de 0.42 % (Singer-Donald et al., 2008). La recuperación del Cu en terreros de lixiviación involucra la adición de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), para obtener una solución enriquecida con Cu, Fe (hierro) y otros metales, que es almacenada en el represo Tinajas 1. Esta solución ferrocuprífera tiene valores bajos de pH y Conductividad Eléctrica (Ce) elevada, asociados a altas concentraciones de metales disueltos y sulfatos (Romero Lázaro et al., 2019).

Con relación a la cuenca del Río Sonora, la coloración rojiza natural del agua, de los suelos y de los sedimentos, en diversos sitios, tiene su origen en la meteorización de minerales que contienen sulfuros de algunos metales pesados, hallados en los yacimientos a lo largo de la ruta del río. Tales yacimientos son depósitos hidrotermales compuestos (Ochoa-Landín et al., 2011). De esta manera, la presencia de metales pesados y metaloides en el agua, en los sedimentos y en los suelos de la cuenca puede llegar a tener un origen natural o antropogénico (Pérez-Segura, 2014).

## **1.2 Geología**

En la cuenca se tienen diferentes registros de rocas, a continuación, estas se describen con base en lo dicho por diferentes autores, y pueden observarse en el Mapa 2.

### **1.2.1 Rocas sedimentarias**

Depósitos detríticos no consolidados del Plioceno Cuaternario, entre ellos se incluyen aluviones, abanicos aluviales y coluviones.

Formación Báucarit: estas rocas son las más abundantes en términos de exposición superficial, y consisten principalmente de conglomerados y areniscas, ambos depositados en cuencas formadas durante la fase extensional del Oligoceno tardío y del Mioceno, en el Noroeste de México. Debido a su posición topográfica baja han sido mejor preservadas de procesos erosivos que aquellas que se encuentran en sitios más altos. Estas unidades continentales detríticas son representativas de la composición geológica superficial de la cuenca del Río Sonora, durante dicha fase extensional (King, 1939; Roldán-Quintana & Grijalva-Noriega, 1998).

Rocas sedimentarias marinas: esta litología corresponde esencialmente a rocas del Grupo Bisbee del Cretácico temprano, compuestas de alternancias de areniscas, limolitas y calizas. Estas rocas afloran solamente al Norte de la localidad de Arizpe, en el Norte de la cuenca del Río Sonora, por ejemplo, en el puerto El Zarape o en el área de la mina El Gachi, al Sureste de Arizpe (González León et al., 2000).

Cuarcita: son areniscas de cuarzo recristalizadas del Paleozoico, las cuales aparecen en el área de Bacoachi.

### **1.2.2 Rocas intrusivas**

Rocas graníticas: esta litología corresponde a las rocas plutónicas que se emplazaron durante el evento magmático Laramide, ocurrido entre 90 y 40 Ma (millón de años). Estas representan el segundo tipo de roca más importante, en términos de exposición superficial, y forman el Batolito de la sierra de Aconchi y de la sierra Los Locos, así como otros plutones de menor tamaño (Damon et al., 1983).



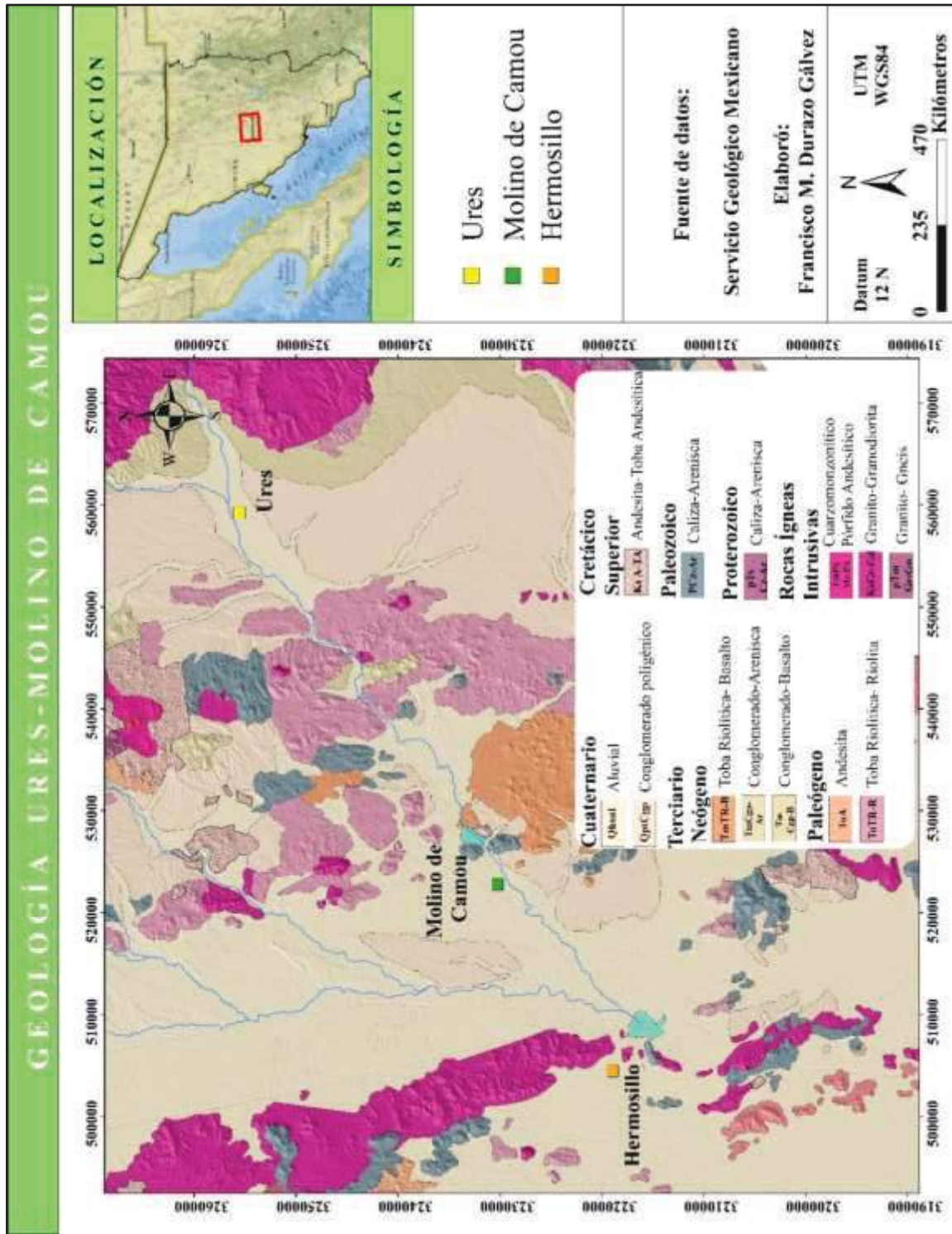
Rocas volcánicas félsicas: se refieren a dacitas, riocacitas y riolitas pertenecientes a dos unidades geológicas principales, la Formación Tarahumara del Cretácico tardío y el volcanismo contemporáneo de la Sierra Madre Occidental (Calmus et al., 2016).

Rocas volcánicas intermedias: las rocas de este grupo tienen un porcentaje de sílice entre 55 y 65 %, y son las andesitas pertenecientes a la Formación Tarahumara. En la región central de Sonora existe un cambio progresivo de la composición de dicha formación, de más intermedia en el Sur a más félsica en el Norte del estado. Por su composición, las andesitas de esta formación son las rocas más susceptibles de ser alteradas por fluidos hidrotermales, y en algunos casos, de hospedar mineralización (Calmus et al., 2016).

Basaltos: esta litología consiste en flujos de lava pobres en sílice y ricos en minerales ferromagnesianos. En la cuenca del Río Sonora, estas rocas son comunes en la base de la Formación Báucarit o se intercalan con los conglomerados de esta, en particular, al sur de Arizpe.

### **1.2.3 Metamorfismo de contacto**

Roca de metamorfismo de contacto: corresponde a calizas del Paleozoico que fueron metamorfizadas por la interacción con rocas intrusivas durante su emplazamiento y enfriamiento. Este metamorfismo de contacto generó la formación de depósitos de tipo skarn y aureolas de silicatos cálcicos con enriquecimiento de Fe, W, Mn (manganeso), Cu, Be (berilio) y U (uranio). Estas rocas se encuentran con frecuencia en el sur de la sierra de Aconchi, al Oeste de Baviácora (Calmus et al., 2016).



Mapa 2. Geología del área de estudio; Fuente: SGM.

### 1.3 Uso del suelo y vegetación en la cuenca del Río Sonora

En la Tabla 1 se presenta la estadística de área de suelo, modificada con base en la información de mapas de uso de suelo y vegetación del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (1990-2012). La superficie total en hectáreas es de 3,878,208, lo que equivale a 38,782 km<sup>2</sup>, correspondientes a la cuenca del Río Sonora y Bacoachi (30 913km<sup>2</sup> y 7 869 km<sup>2</sup>, respectivamente).

Esta información muestra que la cuenca del Río Sonora ha sido modificada en un 9.15 % de la superficie, en especial, para uso agrícola, lo que representa un 8.04 %, uso urbano registró un 0.32 %, uso acuícola un 0.4% y obras hidráulicas un 0.23 %, mientras existe un 0.16 % de suelo desnudo. El resto de la superficie está ocupada por matorrales 48.4 %, mezquiales 21.4 % y pastizales 11.8%.

**Tabla 1.** Uso de suelo y vegetación; Fuente: INEGI 2012.

<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Superficie (ha)</b>	<b>%</b>
<b>Uso de suelo</b>	Acuicultura	15,629	0.40 %
	Agricultura	311,702	8.04 %
	Áreas sin vegetación aparente.	6,276	0.16 %
	Obras hidráulicas (presas).	9,022	0.23 %
	Urbano	12,485	0.32 %
<b>Vegetación</b>	Bosque templado.	286,241	7.38 %
	Dunas costeras.	1,880	0.05 %
	Humedales costeros.	62,463	1.61 %
	Matorrales	1,877,143	48.4 %
	Mezquital	828,146	21.4 %
	Pastizales	456,972	11.8 %
	Selva baja	1,543	0.04 %
	Vegetación de desierto.	336	0.01 %
Vegetación ribereña.	8,370	0.22 %	
<b>Total</b>		<b>3,878,208</b>	<b>100 %</b>

### 1.3.1 Flora

El Programa de Desarrollo Integral para la Restauración Hidrológica del Río Sonora (CIAD, 2013) presenta evidencia de 3,843 especies de plantas vasculares, clasificadas en 1,107 géneros y 188 familias; del total de las especies, 3 237 se reconocen nativas (ver Anexo 1).

El Río Sonora se encuentra en los límites de distribución de especies de afinidades boreales y neotropicales, lo que lleva a una alta diversidad florística, en términos relativos a la disponibilidad de humedad, que es la limitante clave para el desarrollo de las plantas, a pesar de la falta de inventarios y de datos de la distribución de especies en esta región.

En este lugar, la presión sobre los recursos naturales es el resultado de ciertas actividades humanas, como la extracción de agua con fines industriales, y el cambio de uso de suelo a pastizales inducidos y zonas agrícolas. Las especies con algún grado de protección incluidas en la Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010) (ver Anexo 2) son las especies amenazadas o que están en peligro por el excesivo cambio de uso de suelo, el cual responde a la demanda global.

### 1.4 Contexto regional

La cuenca del Río Sonora está conformada por ocho municipios: Arizpe, San Felipe de Jesús, Aconchi, Banámichi, Bacoachi, Huépac, Baviácora y Ures; así como por poblaciones menores: Molino de Camou, Mesa del Seri, San Bartolo, Topahue y San José de Gracia, que hacen parte del municipio de Hermosillo.

Las proyecciones de crecimiento poblacional para la cuenca están basadas en las dos localidades urbanas (Cananea y Hermosillo). En la Tabla 2 se puede ver el resultado de proyección para 2030.

**Tabla 2.** Proyección poblacional; Fuente: CONAPO, 2015b.

Cuenca	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Río Sonora	681 502	771 149	830 587	891 660	949 621	1 004 471	1 056 209

En la Tabla 3 se muestra el total de habitantes por cada municipio, donde se considera el ejido Molino de Camou. La población global de la cuenca se calcula en 21 949 habitantes, según cifras del INEGI (INEGI, 2015b), sin contar la población de Hermosillo, cuya cifra es de 884 273 habitantes.

En el perfil demográfico de los municipios se observa que del 2005 al 2010 la población del Río Sonora aumentó 7.2 %; sin embargo, de 2010 a 2015 disminuyó 6.1% (columna variación 10-15), lo cual se ve reflejado en siete municipios: Ures, Arizpe, Baviácora, Huépac, Molino de Camou y Bacoachi (ordenados de mayor a menor impacto).

**Tabla 3.** Total de habitantes por cada municipio 2010-2015; Fuente: INEGI

Habitantes por municipio	2005	2010	2015	Variación 05-10	Variación 10-15	Variación Global	% 05-10	% 10-15	% Global
Molino de Camou	983	1,212	1,116	229	-96	133	23 %	-8 %	14 %
Ures	8,420	9,185	8,704	765	-481	284	9.1 %	-5.2 %	3.4 %
Arizpe	2,959	3,037	2,677	78	-360	-282	2.6 %	-11.9 %	-9.5 %
San Felipe de Jesús	312	396	407	84	11	95	26.9 %	2.8 %	30.4 %
Aconchi	2,452	2,637	2,756	185	119	304	7.5 %	4.5 %	12.4 %
Banámichi	1,464	1,646	1,612	182	-34	148	12.4 %	-2.1 %	10.1 %
Huépac	1,032	1,154	927	122	-227	-105	11.8 %	-19.7 %	-10.2 %
Baviácora	3,404	3,560	3,312	156	-248	-92	4.6 %	-7.0 %	-2.7 %
Bacoachi	1,456	1,646	1,554	190	-92	98	13 %	-5.6 %	6.7 %
Hermosillo	701,838	784,342	884,273	82,504	99,931	182,435	11.8 %	12.7 %	26.0 %
<b>Total: Río Sonora</b>	<b>21,499</b>	<b>23 261</b>	<b>21 949</b>						

Cabe añadir que la migración en este periodo 2010-2015 no está relacionada con salir de la comunidad a estudiar en Hermosillo, sino con salidas a lugares cercanos para buscar trabajo, debido a la baja en la economía regional (UNIRADIO, 2016). Suelen migrar personas jóvenes, puesto que no encuentran motivación para quedarse en la comunidad.

### 1.4.1 Economía regional

La economía regional es variada en función de los recursos naturales. Es el caso del municipio de Cananea, ubicado en la cuenca alta, donde la actividad minera es la fuente de ingreso más importante, junto con la agricultura y la ganadería.

En el resto de las comunidades del Río Sonora es necesario precisar que el trabajo relacionado con las actividades agrícolas, al parecer, está siendo desplazado por las actividades de comercio y

prestación de servicios. Solamente en los municipios de Arizpe y Ures, el trabajo agrícola ocupa un porcentaje significativo. Lo anterior se refleja en que el total de hectáreas cosechadas en la región bajó de 9,263 ha en 2010 a 6,788 ha en 2016, es decir, un 26.7 % menos (Luque et al., 2019).

**Tabla 4.** Contexto regional; Fuente: INEGI, 2016

Municipio	Molino de Camou	Ures	Arizpe	San Felipe de Jesús	Aconchi	Banámichi	Huépac	Baviácora	Bacoachi
Sup. territorial (ha)	1,427	261,856	3,073	15,280	35,674	773,000	31,737	85,896	126,065
Sector salud	60.0 %	80.2 %	79.1 %	91.6 %	90.3 %	89.5 %	94.3 %	89.5 %	74.1 %
Educación básica	38.0 %	66.2 %	75.5 %	66.2 %	49.9 %	68.9 %	69.0 %	69.0 %	42.2 %
Educación media	12.0 %	23.2 %	14.7 %	17.2 %	24.8 %	18.1 %	17.2 %	21.0 %	18.0 %
Educación superior	6.0 %	11.1 %	5.3 %	14.2 %	21.9 %	9.0 %	10.6 %	6.6 %	3.7 %
Agua potable	94.0 %	97.0 %	94.7 %	98.6 %	97.7 %	98.0 %	99.0 %	98.0 %	96 %
Energía eléctrica	95.0 %	99.0 %	99.0 %	100.0 %	99.1 %	99.0 %	100.0 %	99.0 %	95.7 %
Comerciantes	38.0 %	37.9 %	36.3 %	38.0 %	36.3 %	38.2 %	31.6 %	40.9 %	18.5 %
Trabajadores industria	27.0 %	20.3 %	17.1 %	20.3 %	26.9 %	26.2 %	19.0 %	26.3 %	8.0 %
Trabajadores agrícolas	14.0 %	24.1 %	29.9 %	24.1 %	17.1 %	17.2 %	20.2 %	15.2 %	30.3 %
Profesionista/técnicos	21.0 %	17.0 %	17.0 %	17.0 %	17.1 %	15.7 %	26.2 %	16.9 %	11.0 %

En la Tabla 4 aparecen algunos indicadores socioeconómicos de los municipios de la región, para comprender mejor su contexto social; allí se observa que el ejido Molino de Camou presenta un mayor rezago social y educativo. De manera general, se podría afirmar que la mayoría se dedica a la industria (comercio, servicios, etc.), y en menor medida al trabajo agrícola.

#### 1.4.2 Sector primario

La agricultura intensiva es la actividad primordial en Río Sonora, en particular en las unidades para el desarrollo rural, que constituyen núcleos pequeños, y se basa en la agricultura de riego; en los demás casos, la actividad generalizada es la ganadería extensiva o no estabulada (CIAD, 2013).

#### 1.4.3 Sector secundario

La minería tiene varios proyectos, como se ve más adelante; esta representa el 88.9 % del consumo de agua industrial en la cuenca y la mayor parte se localiza en el alto del Río Sonora. La

industria está más asociada a la ciudad de Hermosillo con la presencia de maquiladoras (manufactura, alimentaria, etc.).

#### **1.4.4 Sector terciario**

En los grandes asentamientos, las actividades comerciales, industriales y de servicios son fundamentales, muestra de ello son Cananea y Hermosillo.

### **1.5 Característica social**

#### **1.5.1 Ures**

El municipio de Ures se localiza en el centro del estado de Sonora, en las coordenadas 29°25'45"N y 110°23'3"O, se encuentra a una distancia de 77 kilómetro de Hermosillo, y a él se accede por la carretera federal 14; posee una extensión territorial de 261,856 ha, de la cual 98,878 hectáreas están destinadas a la agricultura y ganadería (RAN, 2018).

Según datos del INEGI (2015a), Ures tiene una población de 8,704 habitantes, donde la mayoría son hombres, en un 51.6 %, mientras el porcentaje de mujeres es de 48.4 %. Sobre la cobertura de salud, se estima que el 80.3 % de la población cuenta con servicio médico.

En el caso de la escolaridad, se ha registrado que el 66.2 % de la población alcanza un nivel de educación básico, un 23.2 % media superior y un 11.1 % profesional. Por otro lado, el 3.2 % de la población no tiene ningún tipo de instrucción escolar.

Respecto al acceso a los servicios públicos e infraestructura, se evidencia que de los 2,797 hogares en el municipio, el 90.4 % cuenta con servicio de agua potable, el 97.5 % con drenaje y el 99.1 % con electricidad (INEGI, 2015b). Además, estudios hechos por CONAPO (2015) indicaron que el nivel de marginación que prevalece en el municipio es muy bajo.

## **1.5.2 Molino de Camou**

El ejido Molino de Camou pertenece al municipio de Hermosillo y se localiza en las coordenadas 29°16'17" N y 110°38'20" O, está ubicado en el kilómetro 16 de la carretera federal 14 y se encuentra a una altura de 270 m s. n. m. El ejido tiene una extensión territorial de 1,427 ha, de la cual 1,366 hectáreas están destinadas a la agricultura y ganadería (RAN, 2018).

La población total de Molino de Camou (San Isidro) es de 1,116 personas, allí la mayoría son personas de género masculino, en un 51.7 %, y el 48.3 % son de género femenino; de esta población, el 41.3 % son menores de edad y el 58.7 % adultos. Como parte de este último porcentaje el 13.5 % tienen más de 60 años.

En torno a la cobertura de salud, se estima que el 60 % de la población es derechohabiente de alguna institución pública (INEGI, 2015a). Por su parte, el 78 % de la población cuenta con un nivel de educación básico, el 15 % media superior y el 6 % profesional; tan solo el 3.2 % de la población no tiene ningún tipo de instrucción escolar.

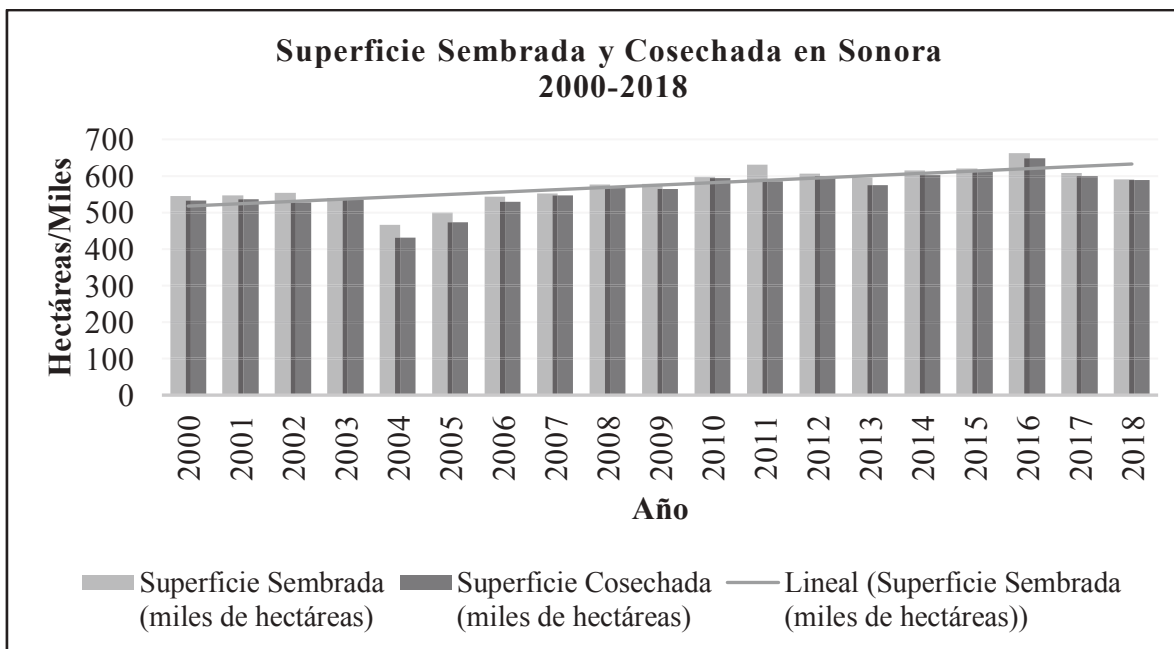
Para el caso del acceso a los servicios públicos e infraestructura, se registran 273 viviendas, el 14 % de ellas tienen piso de tierra y el 12 % consisten en una sola habitación. El 94 % cuentan con servicio de agua potable, el 78.8 % con drenaje, y el 95 % tienen acceso a la luz eléctrica. La estructura económica permite que el 3 % cuente con una computadora, el 44 % con una lavadora y el 91 % con un televisor (INEGI, 2015b). Finalmente, estudios hechos por CONAPO (2015) señalaron que el nivel de marginación que prevalece en el ejido es medio.

## **1.6 Antecedentes de actividades antrópicas**

### **1.6.1 Agricultura**

Sonora cuenta con el 7 % de la superficie destinada a la agricultura (INEGI, 2016), de este porcentaje, el 93 % es por riego y el 7 % temporal (López-Reyes, 2001). Los centros agrícolas más importantes por su extensión y producción están ubicados en la costa de Hermosillo, y al sur en el valle del río Yaqui y el valle del río Mayo. Otras regiones agrícolas relevantes, pero de menor extensión, se hallan a lo largo de las riberas de los ríos Asunción, Sonora y San Miguel (Cornejo-Denman, 2017).



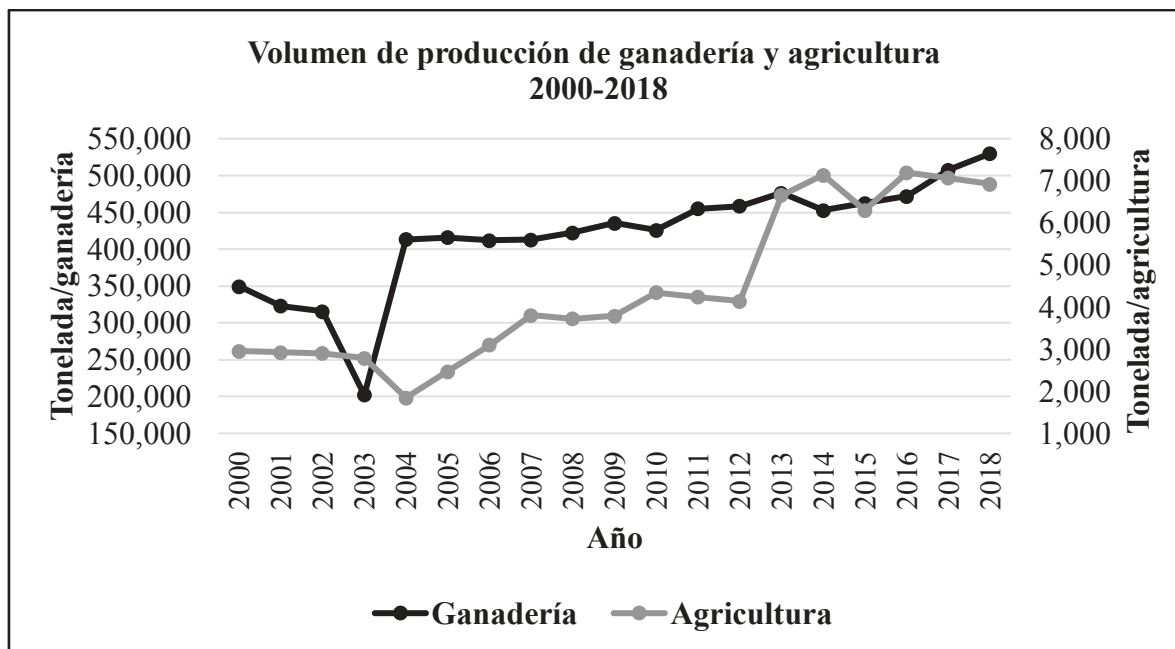


**Gráfica 1.** Superficie sembrada y cosechada en Sonora; Fuente SADER, 2019.

En la Gráfica 1 se tiene el registro de superficie sembrada y cosechada en el estado de Sonora, en promedio, del 2000 al 2018 se ve un volumen de producción de 4,500 toneladas de diferentes cultivos. El año más bajo de producción es 2004, con 1,800 toneladas, y 2012 es el año más alto con 7,200 toneladas; a partir de este año se ha mantenido la producción entre 5,000 a 7,000 toneladas del 2012 al 2018.

La agricultura en Sonora se mantiene en los primeros lugares nacionales en producción de espárrago, uva y trigo, cuyo cultivo implica un alto consumo de agua (Fimbres & Lizárraga, 2009). Gracias a los datos de la SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural) (2019), se observa en la Gráfica 2 la producción agropecuaria del estado de Sonora, donde se evidencia un crecimiento en la producción ganadera y agrícola del lugar.

Por otro lado, la región del Río Sonora tiene una superficie agrícola de 7,517 hectáreas. Lo que más se cultiva en esta zona es trigo, forraje, ajo, avena, vid, cebolla y nogal (SAGARPA, 2015).



**Gráfica 2.** Volumen de producción ganadera y agrícola: 2000-2018; Fuente: SADER, 2019.

### 1.6.1.1 Efectos de la agricultura

Los problemas primordiales en el sector de la agricultura en la región están relacionados con el cambio de uso de suelo, la disponibilidad y calidad del agua (CONAGUA, 2015), dado que la mayor parte concesionada está destinada al uso agrícola. Lo anterior representa un deterioro para los ecosistemas, debido a la disminución en la disponibilidad de agua. Otros problemas de la agricultura son la salud de los jornaleros agrícolas (Calvario Parra, 2007) y la intrusión salina a causa de la sobreexplotación de los acuíferos en la costa de Hermosillo (Vega-Granillo et al., 2011).

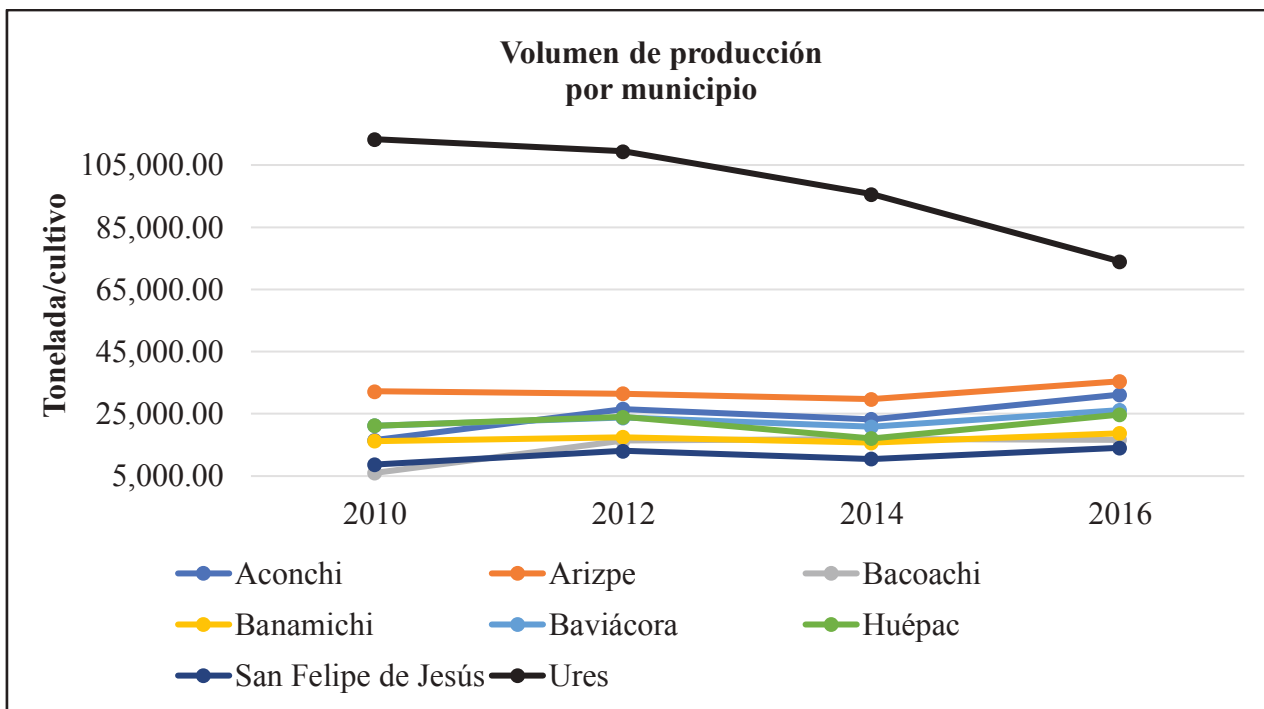
Dicho impacto por cambio de uso de suelo significa una alteración en la vegetación, como puede ocurrir con el mezquital, el matorral desértico y la vegetación ribereña, con el fin de modificarla por forraje, e incluso, en algunos casos, el área destinada al cultivo pasa a ser suelo desnudo (cultivo inactivo). Esto último se debe a diferentes causas, entre ellas están:

- Dejar de sembrar para que la tierra recupere nutrientes;
- la falta de agua (sequía);
- pérdidas económicas en el ciclo anterior (baja venta en la cosecha);
- y pérdida de la siembra por plagas, inundación, clima extremo, etc.

**Tabla 5.** Hectáreas de agricultura por municipio;  
Fuente: SADER, 2018

Agricultura municipio	Sembrada (ha)				Cosechada (ha)			
	2010	2012	2014	2016	2010	2012	2014	2016
Aconchi	631	1,075	1,014	1,171	631	1,054	851	786
Arizpe	1,436	1,345	1,681	1,743	1,436	1,303	1,200	929
Bacoachi	340	1,115	1,203	1,091	340	1,115	1,168	727
Banámichi	580	784	776	816	570	615	559	245
Baviácora	895	920	787	929	895	920	776	565
Huépac	772	904	738	933	772	854	599	399
San Felipe de Jesús	361	491	379	517	361	491	376	153
Ures	4,363	4 185	2 926	3 552	4,334	4,152	2,889	2,984
<b>Total</b>	<b>9,378</b>	<b>10,819</b>	<b>9,504</b>	<b>10,752</b>	<b>9,339</b>	<b>10,504</b>	<b>8,418</b>	<b>6,788</b>

Ahora bien, en la Tabla 5 se tiene una estadística de superficie sembrada y cosechada, por periodos de dos años, en los municipios que conforman la cuenca del Río Sonora. La superficie sembrada se mantiene constante, sin embargo, la superficie cosechada varía, por ejemplo, para 2012 se obtuvo una superficie de 10 504 ha, lo que significa un aumento de 1 165 ha, comparado con lo registrado en 2010. Para 2016 se cosecharon 6 788 ha, una diferencia de 3 964 ha que se sembraron para ese año. El comportamiento económico en cuanto a la agricultura está representado en la Gráfica 3.



**Gráfica 3.** Volumen de producción agrícola por municipio; Fuente: SADER, 2019.

En esta gráfica el volumen de producción se ve afectado a partir del 2014, cuando comienza a ir en decremento. En estos seis años, algunos municipios tuvieron un poco de crecimiento positivo, como sucedió en Arizpe, Aconchi, Baviácora y San Felipe de Jesús. El resto de los municipios registraron un crecimiento negativo, es el caso de Banámichi, Huépac y Ures, este último con la reducción más alta, pues tuvo casi el 30 %.

### 1.6.2 Ganadería

La ganadería en Sonora incluye particularmente la cría de bovinos y equinos, con una existencia de 1 222 228 cabezas de ganado, de las cuales 1,000,000 se encontraban bajo manejo de libre pastoreo (Elizalde-Castillo, 2017).

En la Tabla 6 se presenta el volumen de producción en toneladas por año, y se observa un aumento en los productos de los diferentes animales, como lo es la carne, la leche, la miel, y otros alimentos producidos en el estado de Sonora.

**Tabla 6.** Volumen de producción ganadera del estado de Sonora;  
Fuente: SADER, 2019.

Volumen/ producción Año	Total	Bovino	Porcino	Aves	Caprinos y ovinos	Equino	Apícola (miel y cera)	Huevo para plato	Piel	Otros	Leche
2000	349,426	42,745	166,240	9,288	390	815	359	114,465	5,573	49,538	49,538
2001	323,142	45,622	129,283	9,622	483	1,183	488	120,210	6,020	32,659	32,659
2002	315,757	38,217	134,413	10,994	609	356	320	117,902	4,812	36,612	36,612
2003	202,125	38,836	145,151	11,632	823	360	548		4,775	700	700
2004	413,264	51,285	199,513	10,781	989	915	452	144,432	4,897	137,578	137,578
2005	416,070	72,229	213,475	10,506	959		743	118,158		133,948	133,948
2006	412,051	75,402	209,305	7,710	1,123		378	118 133		143,925	143,925
2007	412,808	76,140	212,594	5,352	964		369	117,389		139,175	139,175
2008	422,652	74,443	222,356	11,463	910		387	113,093		132,699	132,699
2009	435,413	74,270	221,863	26,514	789		340	111,638		127,250	127,250
2010	426,079	78,688	213,365	22,347	836		377	110,466			130,123
2011	454,884	84,961	223,650	26,976	1,068		250	117,979			112,621
2012	458,307	76,982	233,727	29,301	1,108		516	116,673			111,239
2013	476,378	76,579	242,158	29,353	1,039		410	126,839			112,173
2014	452,981	72,964	223,209	27,860	898		432	127,618			108,709
2015	462,599	71,727	229,020	29,402	735		526	131,189			110,725
2016	472,199	69,084	237,889	33,194	735		583	130,714			116,969
2017	507,399	71,955	261,757	36,896	735		540	135,516			117,723
2018	529,909	76,403	277,451	33,469	794		528	141,264			114,216

### 1.6.2.1 Efectos de la ganadería

La actividad ganadera extensiva ocupa el 80 % de la superficie estatal (López et al., 2010), y debido a las condiciones naturales del ecosistema sonorenses se ha impulsado la conversión de pastizal nativo a pastizal inducido, lo que supone un cambio en el uso del suelo (Cornejo-Denman, 2017).

De igual modo, la introducción de especies exóticas como alternativas de forraje ha causado la pérdida de comunidades vegetales nativas. En el caso del zacate buffel, este se ha expandido a sitios externos al lugar donde fue sembrado inicialmente. Además de modificar el paisaje, estos actos afectan el uso del recurso hídrico, como mencionaron Burquez y Martínez (1997), y para producir 1 kg de carne se requieren 200,000 litros de agua.

### 1.6.3 Minería

Existen un total de 142 proyectos mineros en la cuenca del Río Sonora, de ellos, 22 son de explotación de minerales metálicos, 24 de explotación de minerales no metálicos, y 65 y 31 son de exploración y exploración avanzada, respectivamente (ver Tabla 7). Sonora ocupó el primer lugar de extracción de cobre y oro, con una extracción de cobre de 624 265 toneladas anuales. La empresa Buenavista del Cobre es la que reporta mayor cantidad de producción de este metal, lo que representa el 84.10 % a nivel nacional. En el caso del oro, se tiene registrada una producción anual de 42 290.40 kg, es decir, el 33.34 % a nivel nacional (SGM, 2018).

**Tabla 7.** Unidades mineras cuenca Río Sonora;  
Fuente: SGM, 2018

<b>Unidades mineras cuenca Río Sonora, 2018</b>	<b>Total</b>
Proyecto de explotación de minerales metálicos	22
Proyecto de explotación de minerales no metálicos y banco de materiales	24
Proyecto de exploración avanzada	31
Proyecto de exploración	65
Unidades minero-metalúrgicas y de transformación	19
Plantas de beneficio de minerales metálicos (inactivas)	18
Plantas fundidoras y refinadoras	3
Plantas de beneficio de minerales no metálicos	28

Algunos de los proyectos se describen en los siguientes apartados, con apoyo en los análisis de varios autores.

#### **Buenavista del Cobre**

La mina Buenavista del Cobre, anteriormente llamada mina de Cananea, corresponde a una mineralización tipo pórfido de cobre, catalogada como la más grande de México, con más de 30 Mt (megatoneladas) de Cu contenido y clasificado como supergigante (Laznicka, 2006).

El depósito Buenavista del Cobre ha sido ampliamente estudiado (Bushnell-Ensign, 1988; Ochoa-Landín & Echavarrí, 1978) por autores que describen la geología, las estructuras y la mineralización, desde un contexto regional. En este distrito se presentan varios tipos y estilos de

mineralización que incluyen brechas magmato-hidrotermales (Cu-Mo), skarn (Cu-Zn) y diseminado (Cu-Mo) (Calmus et al., 2016).

### **Santa Elena**

Este depósito se localiza aproximadamente 5 km al Este de Banámichi, y se considera de origen hidrotermal, formado a poca profundidad (1 a 2 km) y relativamente a baja temperatura (150 a 300 °C). La mineralización se extiende a lo largo de una estructura Este a Oeste, con más de 200 m de longitud en superficie. Adicionalmente, los elementos presentes en este lugar son Au, Ag, Zn y Pb, con menor contenido de Cu, Sb (antimonio), As (arsénico), Hg (mercurio) y Se (selenio). Los minerales de mena corresponden a pirita, *electrum* (Au-Ag), esfalerita, galena y arsenopirita. Las leyes son del orden aproximado de 80 g/t Ag y 1.5 g/t Au, con minerales asociados que contienen Sb, Pb, Zn, Ba, Ca y Mn (Calmus et al., 2016).

### **El Jaralito**

El Jaralito es un distrito minero localizado en la parte centro sur de la sierra de Aconchi, aproximadamente a 14 km al Suroeste de Baviácora. Los depósitos en este distrito corresponden a skarns desarrollados en el contacto entre rocas intrusivas y calizas paleozoicas. En este distrito también existen afloramientos de cuerpos pegmatíticos con mineralización de W-Be (Roldan Quintana et al., 1989).

### **San Felipe**

El distrito de San Felipe se localiza, en promedio, a 6 km al Oeste-Noroeste del poblado de San Felipe de Jesús. En este distrito hay varios depósitos minerales en forma de vetas hidrotermales, incluyendo La Artemisa, Santa Rosa y Lamas, así como un cuerpo mineralizado de tipo skarn. En la superficie, estas estructuras cuentan con direcciones Norte-Sur y Este-Oeste, con un espesor promedio de 1 m y son caracterizadas por pirita, calcopirita, galena y esfalerita, covelita, malaquita, azurita y óxidos de Fe (Calmus et al., 2016).

### **1.6.3.1 Efectos de la minería**

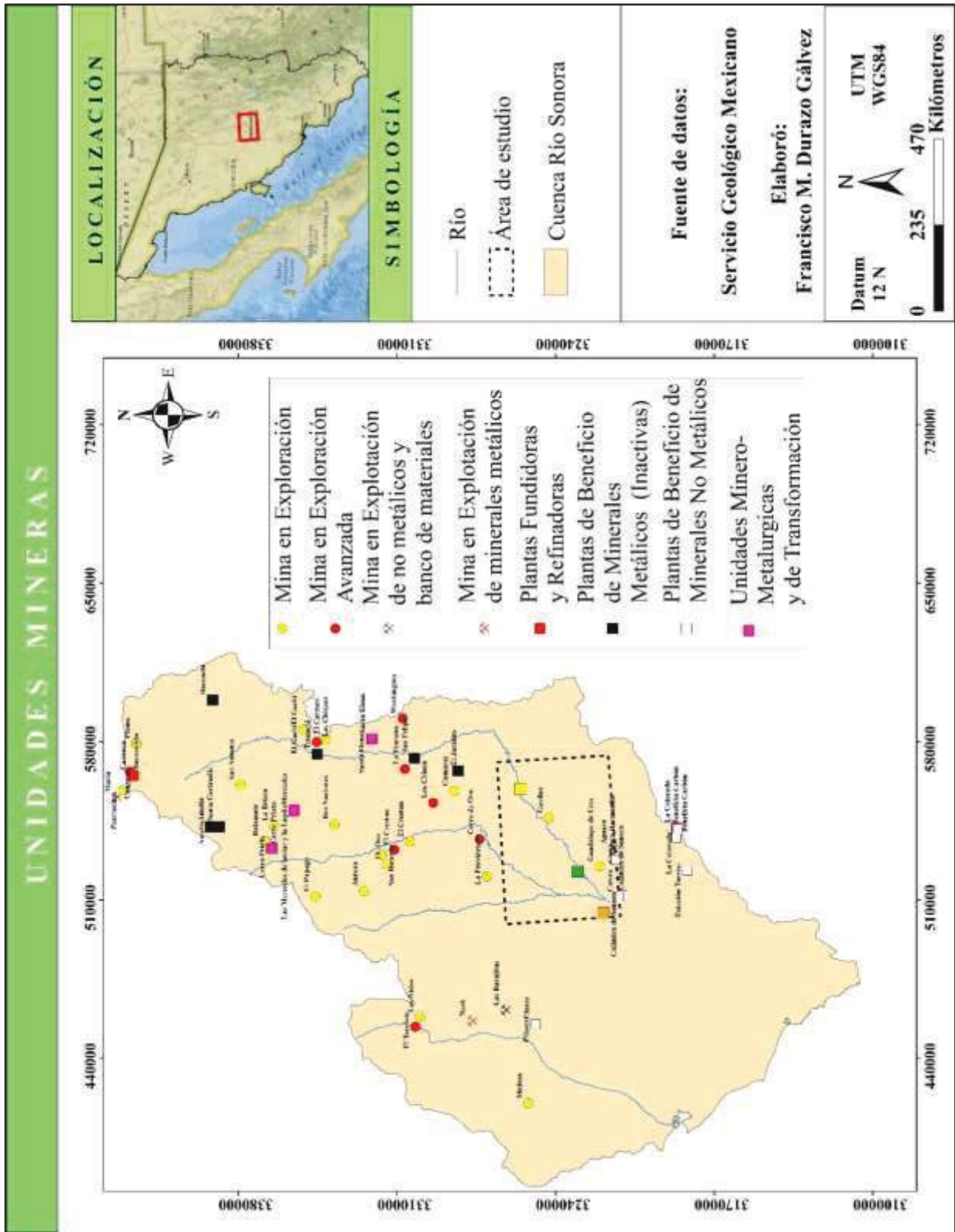
En el Mapa 3 se ubican los diferentes proyectos mineros, plantas de beneficios y plantas fundidoras, pertenecientes a la cuenca del Río Sonora, según datos del documento Panorama Minero del Estado de Sonora (2018).

Es importante considerar la distribución de estos beneficios mineros y entender que la extracción y procesamiento de minerales implican el uso y liberación de diversas sustancias tóxicas –por ejemplo, el cianuro– que afectan a la salud de los mineros y terminan depositadas en el agua y en el suelo, de modo que producen efectos negativos en el resto de la población y en los sistemas naturales.

Por su parte, las etapas de exploración, explotación, beneficio y fundición destruyen la vegetación y modifican el uso del suelo, afectan cuerpos de aguas, y generan terrenos inestables y jales, con lo cual provocan escurrimientos y arrastre de residuos de drenaje ácido, descargan lixiviados y producen diversos residuos peligrosos que son emitidos al ambiente (Volke et al., 2005).

Un accidente ocurrió el 6 de agosto de 2014, en el Río Sonora, la mina Buenavista del Cobre derramó alrededor de 40,000 metros cúbicos de lixiviado ácido a uno de los arroyos que alimenta al Río Bacanuchi, afluente a su vez del Río Sonora, este suceso fue llamado “el peor desastre ambiental de la industria minera del país”, por el entonces titular de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (R. Díaz-Caravantes et al., 2016).





## 1.7 Variables climatológicas

Para este análisis ambiental es pertinente analizar las variables climatológicas. Se eligieron, entonces, las estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), las cuales contienen diferentes datos, como la evaporación, las temperaturas máxima, mínima, media y la precipitación, respecto a la región en donde se ubica cada una. Los datos de interés para el caso de estudio son la temperatura y la precipitación.

De acuerdo con el área de estudio, se seleccionaron las estaciones climatológicas Ures y El Molinito; sin embargo, para analizar el comportamiento climatológico de la cuenca del Río Sonora y tener una visión un poco más amplia, se incluyeron también las estaciones Bacanuchi y Hermosillo Norte (las coordenadas de cada estación y clave se muestran en la Tabla 8). Estas dos últimas constituyen puntos de referencia de la cuenca, puesto que la estación Bacanuchi se ubica en la parte alta de la cuenca (sierra), y la estación de Hermosillo Norte está ubicada en la parte baja, lo que implica climas diferentes.

**Tabla 8.** Estaciones climatológicas;  
Fuente: CONAGUA, 2018

Estación	Clave	Latitud	Longitud
Ures	26121	29°25'37''	110°23'32''
El Molinito	26313	29°12'47''	110°43'42''
Hermosillo Norte	26139	29°08'06''	110°58'20''
Bacanuchi	26007	30°35'56''	110°14'18''

Las estaciones tienen información de los años 1960 al 2018, y para este estudio solamente se analizaron los datos de los años 1990 al 2018, es decir, un periodo de 28 años.

### 1.7.1 Precipitación

Las mayores precipitaciones se presentan en los meses de julio a septiembre, lo cual es denominado monzón norteamericano o monzón mexicano. Se le llama monzón al cambio estacional en la dirección de los vientos entre el continente y el océano. Existen cuatro regiones donde se generan circulaciones de tipo monzónicas: el Suroeste de Asia y el océano Índico, Australia y la Polinesia, África noroccidental y el Atlántico oriental, así como en la zona que comprende el Suroeste de Estados Unidos y el Noroeste de México (CONAGUA, 2016).

El monzón de Norteamérica o monzón mexicano inicia a finales de junio y va hasta septiembre, anualmente; es generado por los vientos cálidos y húmedos que provienen del océano Atlántico y del golfo de México, por el Este, y del océano Pacífico y el golfo de California, por el Oeste. Estos dos aportes convergen en el Noroeste del territorio nacional y se caracterizan por causar precipitaciones breves, pero torrenciales, aunque no continuas, en extensas áreas del Suroeste de Estados Unidos de América y el Noroeste de México, sobre todo en las montañas de la Sierra Madre Occidental y sus alrededores, que comprenden Sonora, Chihuahua, Sinaloa y Durango (CONAGUA, 2016).

En esos casos, los valores de precipitación promedio anual son de 70 mm hasta 400 mm, datos que superan la climatología de diferentes zonas del Noroeste del país. Más del 60 % de la precipitación anual ocurre durante el periodo monzónico, e incluso, en lugares donde no ha llovido, lo que ayuda a mitigar las condiciones de sequía y beneficia a los sectores agrícola y ganadero (Hernández, 2006).

El promedio por cada estación, de 1990 al 2018, varía de los 246 mm a los 585 mm, estos valores están representados por la estación de Hermosillo y Bacanuchi. Además, el promedio anual de las cuatro estaciones es de 387.4 mm, como se puede ver en la Tabla 9.

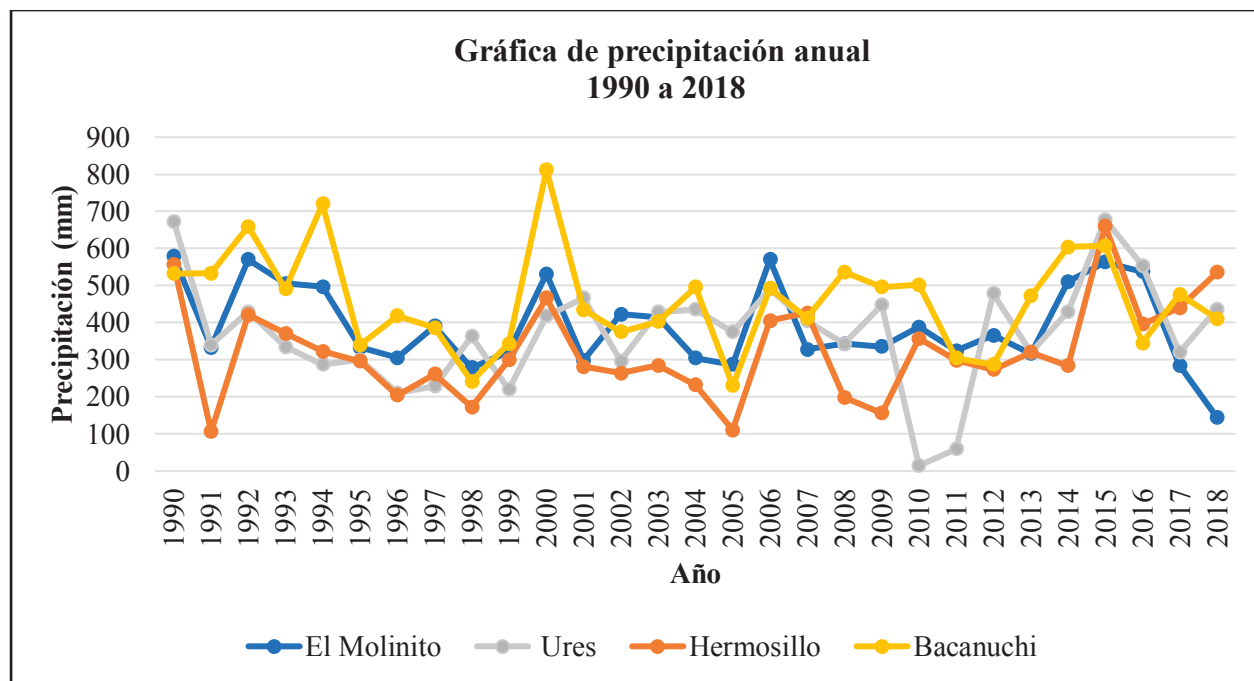
**Tabla 9.** Precipitaciones: 1990-2018;  
Fuente: CONAGUA, 2018.

<b>Año precipitación</b>	<b>Ures</b>	<b>Hermosillo</b>	<b>Molinito</b>	<b>Bacanuchi</b>	<b>Promedio anual</b>
1990	673.20	557.2	578.4	532.1	<b>585.2</b>
1991	340.30	106.2	333.2	533.5	328.3
1992	429.70	420.6	570.2	659.2	519.9
1993	334.90	371.2	505.1	491.1	425.6
1994	287.00	322.4	497.3	<b>720.3</b>	456.8
1995	300.50	295.6	333.2	340.1	317.4
1996	210.80	204.3	305.8	418.2	284.8
1997	228.50	261.6	391.1	386.3	316.9
1998	363.50	172.3	278.5	241.6	264.0
1999	219.65	299.6	321.8	343.7	296.2
2000	418.00	466.4	531.7	811.9	<b>557.0</b>
2001	466.80	281.7	298.5	434.6	370.4
2002	297.20	263.8	422.8	375.7	339.9
2003	428.40	284.5	414.4	402.7	382.5
2004	436.00	232.2	304.8	496.1	367.3
2005	375.50	110.6	287.6	230.1	251.0
2006	490.90	405.8	569.9	492.5	489.8
2007	404.70	425.9	327.70	412.2	392.6
2008	343.00	198.1	343.70	536.3	355.3
2009	447.80	156.63	335.70	495.8	359.0
2010	15.00	357	388.10	502.4	315.6
2011	60.00	298.1	324.70	304.3	246.8
2012	478.50	273.5	365.60	287.0	351.2
2013	320.00	319.8	316.30	471.5	356.9
2014	429.40	284.1	510.70	604.2	457.1
2015	<b>677.80</b>	<b>660.8</b>	<b>563.60</b>	607.1	<b>627.3</b>
2016	553.60	396	537.15	345.0	457.9
2017	320.00	440.2	284.30	476.05	380.1
2018	436.80	536.1	144.65	410.53	382.0
<b>Promedio anual</b>	<b>371.98</b>	<b>324.21</b>	<b>392.64</b>	<b>460.76</b>	<b>387.40</b>

Según estos datos, se considera a los años 1998 y 2011 de bajas precipitaciones, de 2001 a 2004 y 2012 de precipitaciones medias y a los años 1990, 2000 y 2015 de precipitaciones altas. El año con mayor precipitación es el 2015 (627.3 mm) y el de menor precipitación es 2011 (246.78 mm).

La estación climatológica con precipitaciones altas es Bacanuchi, con 811.9 mm en el 2000, y más adelante registra precipitaciones bajas, para los años 2005 y 2012 (230 mm y 287 mm, respectivamente). En el caso de la estación Hermosillo, esta presenta menor precipitación en 1991 (106 mm) y en el 2015 obtuvo la mayor (660.8 mm).

El promedio de las estaciones, para los años 1990 al 2018, es de 387.4 mm, siendo 2015 el año que presenta mayor precipitación de las tres, a excepción de Bacanuchi. En la Gráfica 4 es posible observar el comportamiento de la precipitación de cada estación.



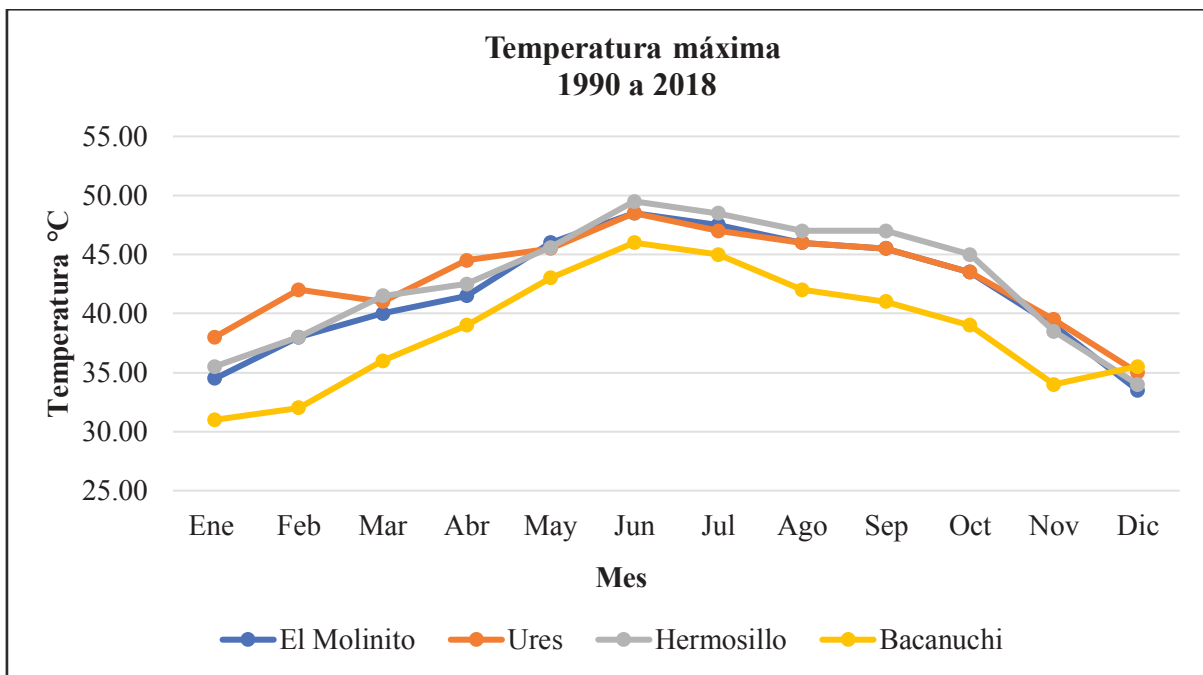
**Gráfica 4.** Precipitación anual 1990 a 2018; Fuente: CONAGUA, 2018.

En 2014 se registró dos huracanes: el huracán Norbert, del 2 al 10 de septiembre con vientos máximos de 205 km/hr de categoría 3 según la escala de Saffir-Simpson (1969); y el huracán Odile, del 11 y 19 de septiembre con vientos máximos de 220 km/hr de categoría 4 de la misma escala.

## 1.7.2 Temperatura

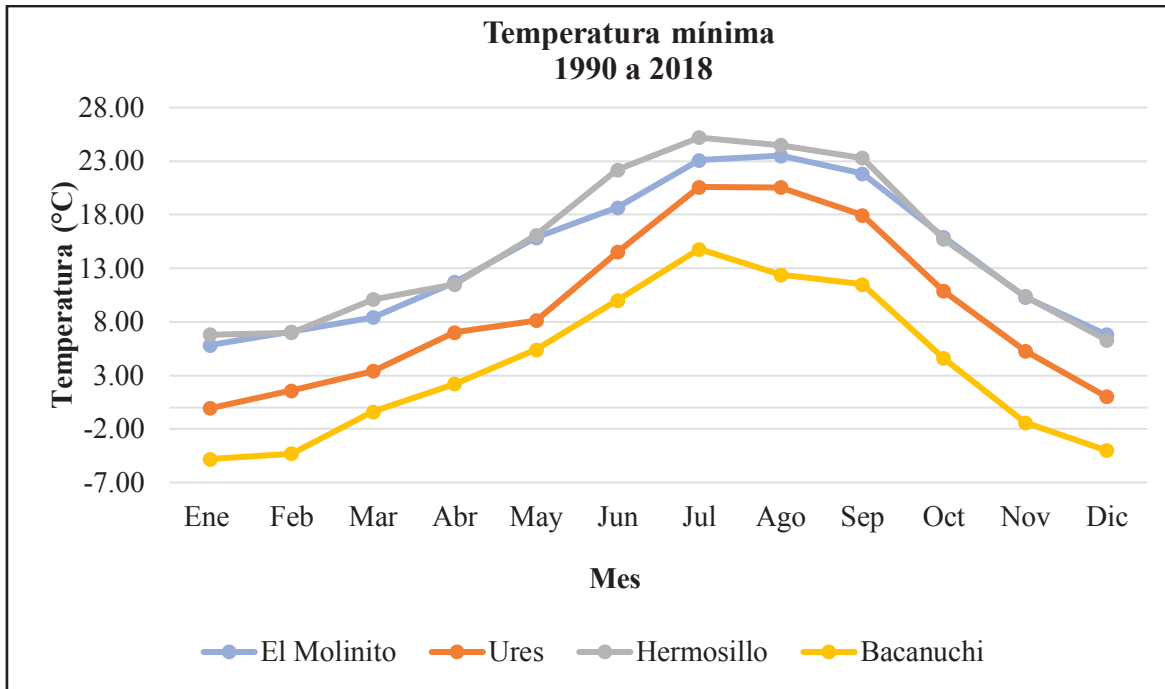
Las temperaturas más altas se presentan en los meses de junio, julio, agosto y septiembre, con registros de hasta los 49.5 °C. Tanto la precipitación como la temperatura influyen directamente en el equilibrio del agua, y provocan cambios en el régimen de humedad del suelo que, al mismo

tiempo, incide en el crecimiento de las plantas y afecta a la fenología de la vegetación (Romo-León et al., 2014).



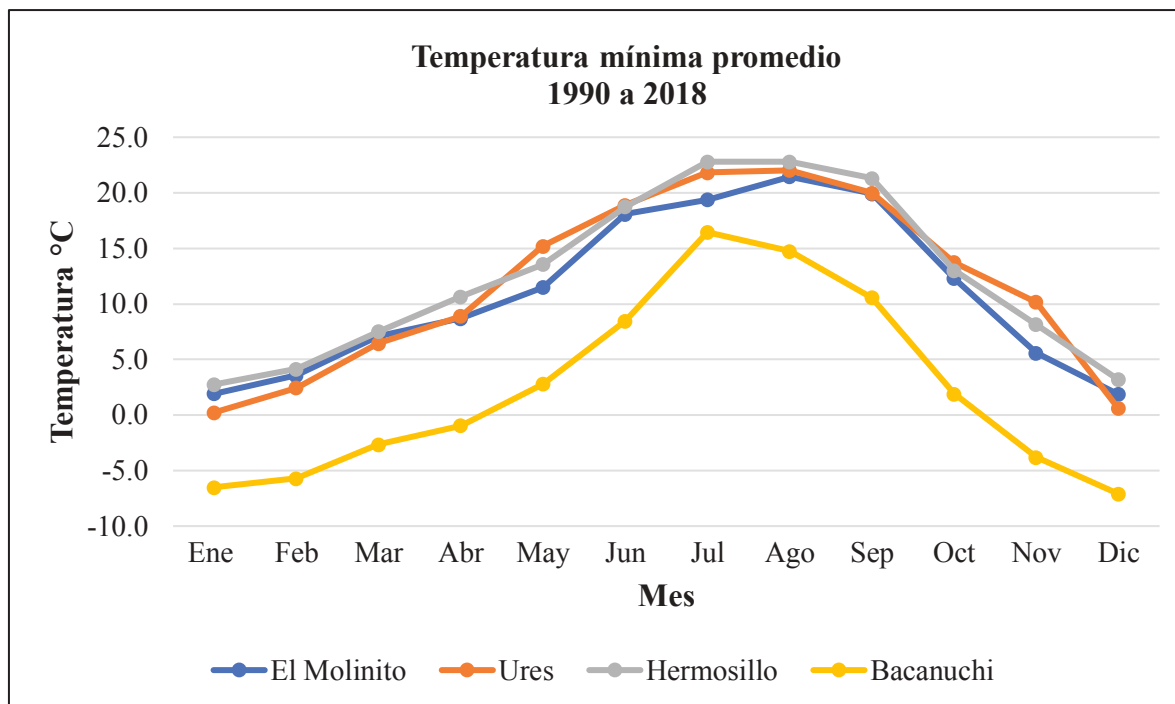
**Gráfica 5.** Temperatura máxima 1990-2018; Fuente: CONAGUA, 2018.

En la Gráfica 5 se aprecia el comportamiento de la temperatura, sus picos más altos se dieron en los meses de junio a agosto, y en cada estación climatológica se tienen registradas diferentes temperaturas máximas extremas. De la misma forma, se analizaron los datos de los años 1990 a 2018, y en la estación El Molinito se tiene una máxima registrada de 49.5 °C en los meses de junio y julio de los años 2014 y 2011; en la estación Ures se estiman unos 45 °C en los meses de junio (2007 y 2013), julio (2008) y agosto (2008 y 2011), como temperaturas máximas extremas.



**Gráfica 6.** Temperatura mínima: 1990 a 2018; Fuente: CONAGUA, 2018.

En la Gráfica 6 se muestran las estaciones climatológicas por año, en cuanto a las temperaturas mínimas registradas. Se observa que Bacanuchi registra temperaturas mayores bajo cero, y Hermosillo es el lugar que se mantiene arriba de los 0 °C. Las temperaturas mínimas registradas se tienen en los meses de diciembre a febrero en las estaciones de Hermosillo y El Molinito; por último, en Bacanuchi y Ures hay registros en los meses de noviembre hasta marzo, y en algunos años en abril, como fue el caso de Bacanuchi en 2016 con -3 °C en dicho mes.



**Gráfica 7.** Temperatura mínima 1990-2018; Fuente; CONAGUA, 2018

En la Gráfica 7 se da a conocer el promedio anual de 1990 a 2018; en este caso, en los meses de diciembre a febrero se tiene registro de las temperaturas mínimas, y se confirma que las temperaturas mayores ocurren en los meses de junio a septiembre.

### 1.8 Percepción remota

La teledetección o percepción remota es una ciencia que, a través de satélites, observa y obtiene información de la Tierra; esta información es adquirida por los diferentes sensores, cada uno con características técnicas particulares. Así como se cuenta con satélites gratuitos de alta-media resolución espacial, también se tienen satélites privados de alta calidad. Lo sorprendente de esta ciencia es que la información se adquiere desde el espacio, sin estar en contacto directo con el objeto en superficie (Chuvieco, 1990).

En las últimas décadas, la implementación de la percepción remota ha aumentado y es aplicada en diferentes disciplinas, como la ambiental, la oceanografía, la atmosférica, las ciencias sociales, la economía, la cartografía, la hidrología, la geología, etc. Para los geólogos es una herramienta que permite evaluar el terreno e identificar zonas de interés mineralógico, o bien realizar análisis



ambientales, como es la intención de este estudio. En el siguiente listado se describen algunos elementos importantes de la percepción remota, de acuerdo con (Tso & Mather, 2009):

- Fuentes de energía: el sol es la fuente principal de energía y su radiación incide directamente en la atmósfera terrestre; de esta, un porcentaje es reflejado y otro es absorbido o transmitido a través del objeto que se encuentra en superficie, el cual finalmente refleja la energía, luz o radiación al sensor.
- Atmósfera: la energía del sol interactúa con este elemento al viajar del sensor al objeto y viceversa.
- Interacción con el objeto: al llegar la energía al objeto (vegetación, suelo, agua, etc.), según las características físicas, se genera una firma espectral particular.
- Sensores remotos: son los encargados de recibir la información generada en el proceso de interacción entre sol y objeto. Estos recogen y graban la radiación electromagnética reflejada o emitida por el objeto a la atmósfera.
- Transmisión, recepción y procesamiento: la energía almacenada por el sensor es transferida a una estación receptora, en donde se procesan y se obtienen imágenes digitales o satelitales.
- Interpretación y análisis: se analiza la información recibida, se procesa la imagen y se extrae la información que se desee utilizar para determinado estudio.
- Aplicación: después de procesar la imagen y de interpretar la información, esta fase puede ayudar a la toma de decisiones.

Sumado a ello, se tienen diferentes tipos de sensores y se clasifican, dependiendo de su operación, en pasivo y activo. Los sensores pasivos miden la energía que está naturalmente disponible, como ejemplo se tienen los satélites Landsat, Aster (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, en español radiómetro avanzado de emisión y reflexión térmica de transmisión espacial), Modis (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, en español espectrorradiómetro de imágenes de media resolución), Sentinel, etc. Los sensores activos emiten radiación al objeto de interés, y la radiación reflejada del objeto es emitida y detectada por el sensor; algunos ejemplos son los sensores Lidar, Radar, Sonar, entre otros.

Los diferentes satélites utilizados en la teledetección poseen cuatro diferentes tipos de resoluciones (Jensen, 1986), estas se describen a continuación:

- Resolución espacial: para definirla de manera sencilla, es el tamaño de píxel que las imágenes satelitales cubren. Dependiendo del análisis deseado es importante la resolución espacial.
- Resolución espectral: se describe como la habilidad de un sensor de definir intervalos finos de longitud de onda. Cuando más fina es la resolución espectral, más angosta es la gama de longitudes de onda para una banda o canal.
- Resolución radiométrica: los datos de la imagen están representados por números digitales positivos que varían. El máximo número de niveles de luminosidad disponibles va ligado al número de bits utilizados al representar la energía grabada.
- Resolución temporal: se refiere a la frecuencia en que un satélite puede observar la misma zona, también se le conoce como frecuencia de revisita.

Los satélites más comúnmente utilizados en percepción remota para el estudio de la Tierra, desde la perspectiva de (Pérez-Moreno, 2014), son los siguientes:

- Satélites de recursos naturales: Landsat y SPOT (Satellite Pour L'Observation de la Terre, en español satélite para la observación de la Tierra).
- Meteorológicos: GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite, en español Satélite Geoestacionario Operacional Ambiental), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, en español Administración Nacional Oceánica y Atmosférica), SeaWIFS y MODIS).
- Satélites de alta resolución: Ikonos, Quickbird, Geoeye, WorldView).

### **1.8.1 Firma espectral**

En el proceso de clasificación del suelo, llevado a cabo mediante imágenes satelitales, es necesario comprender las características de los sensores antes descritos y los conceptos clave, como el espectro electromagnético.

Las ondas electromagnéticas cubren una amplia gama de frecuencias o de longitudes de ondas, y pueden clasificarse según su principal fuente de producción. La clasificación no tiene límites precisos, pero es posible adaptarla como lo muestra la Tabla 10.

**Tabla 10.** Rangos de espectro electromagnético;  
Fuente: Leonberger, 2002.

Rango del espectro	Intervalo de frecuencia (Hz)
Radio microondas	0 a $3 \times 10^{12}$
Infrarrojo	$3 \times 10^{12}$ a $4.6 \times 10^{14}$
Luz visible	$4.6 \times 10^{14}$ a $7.5 \times 10^{14}$
Ultravioleta	$7.5 \times 10^{14}$ a $6 \times 10^{16}$
Rayos X	$6 \times 10^{16}$ a $1 \times 10^{20}$
Radiación gamma	$1 \times 10^{20}$ a

**Ondas de radiofrecuencia:** sus frecuencias van de cero a uno por diez a la nueve ( $1 \times 10^9$ ) Hz, se usan en los sistemas de radio y televisión, y se generan mediante circuitos oscilantes. Este tipo de frecuencias tiene la particularidad de producir señales capaces de penetrar las nubes, la niebla y las paredes, lo que permite usarlas para comunicación vía satélite, entre celulares o para transmisión de radio (Leonberger, 2002).

**Microondas:** se pueden producir mediante dispositivos electrónicos. Entre otras cosas, se utilizan para el funcionamiento de radares de detección, en el análisis de detalles finos de la estructura atómica y molecular, y al ser capaces de alterar la vibración de las moléculas produciendo un aumento de la temperatura, también se hacen útiles en la cocina a microondas (Leonberger, 2002).

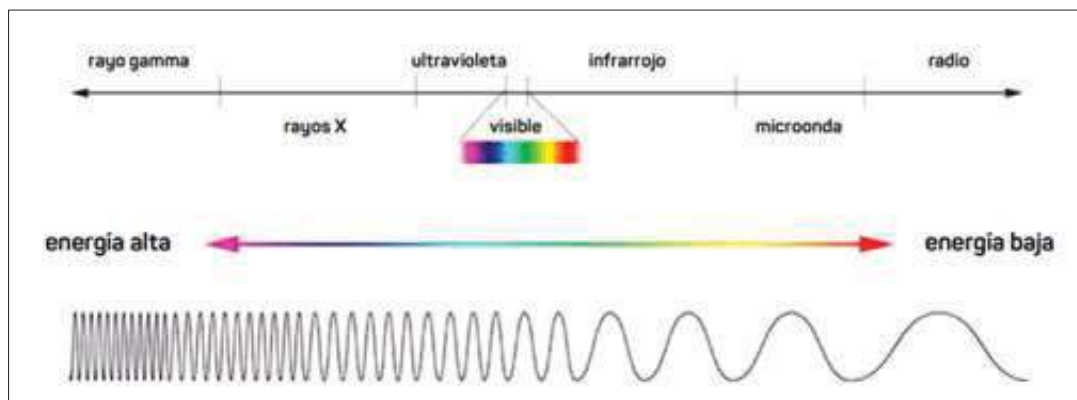
**Rayos infrarrojos:** esta radiación tiene la particularidad de ser generada por cualquier cuerpo por encima del 0 K (o 273 °C bajo cero). Este tipo de radiaciones tienen muchas aplicaciones en la industria, la medicina y la astronomía. Dicho de un modo sencillo, el cuerpo tiene una temperatura promedio de 37 o 210.15 K, por lo tanto, provoca una radiación infrarroja, y a mayor temperatura, la radiación aumenta y cambia su espectro. Este fenómeno se emplea para detectar cuerpos a través de algunas barreras opacas y, en especial, en la oscuridad. (Leonberger, 2002).

**Luz visible:** la luz blanca está constituida por la combinación de ondas que tienen energías semejantes, debido a que ninguna de estas predomina sobre las otras. La radiación visible va desde  $384 \times 10^{12}$  hasta  $769 \times 10^{12}$  Hz. Las frecuencias más bajas de la luz visible (longitud de onda larga) se perciben como rojas, y las de más alta frecuencia (longitud corta) aparecen violetas. (Leonberger, 2002).

**Radiación ultravioleta:** sus longitudes de onda se extienden entre 10 y 400 nm (nanómetros), más cortas que las de la luz visible. Este tipo de radiación es producida por átomos y moléculas sometidas a descargas eléctricas. Otra de las características de este rango es que es uno de las componentes principales de la radiación solar (Leonberger, 2002).

**Rayos gamma:** se localizan en la parte del espectro que tiene las longitudes de onda más pequeñas, entre 10 y 0.01 nm.

**Rayos X:** este rango se utiliza en medicina diagnóstica. Se puede producir, por ejemplo, a partir del choque en una placa metálica de electrones acelerados, pues la radiación de frenado produce rayos x. Estos rayos se han utilizado en medicina desde el mismo momento en que los descubrió Röntgen, dado que los huesos absorben mucha más radiación que los tejidos blandos. Sin embargo, la gran energía de los fotones de los rayos x son peligrosos para los organismos vivos (Leonberger, 2002).



**Ilustración 1.** Rango de ondas de luz; Fuente NASA.

En la Ilustración 1 se ven los rangos del espectro electromagnético, en este caso, las ondas de luz se extienden desde los rayos gamma de longitud de onda muy corta y alta energía, hasta las ondas muy largas y de baja energía.

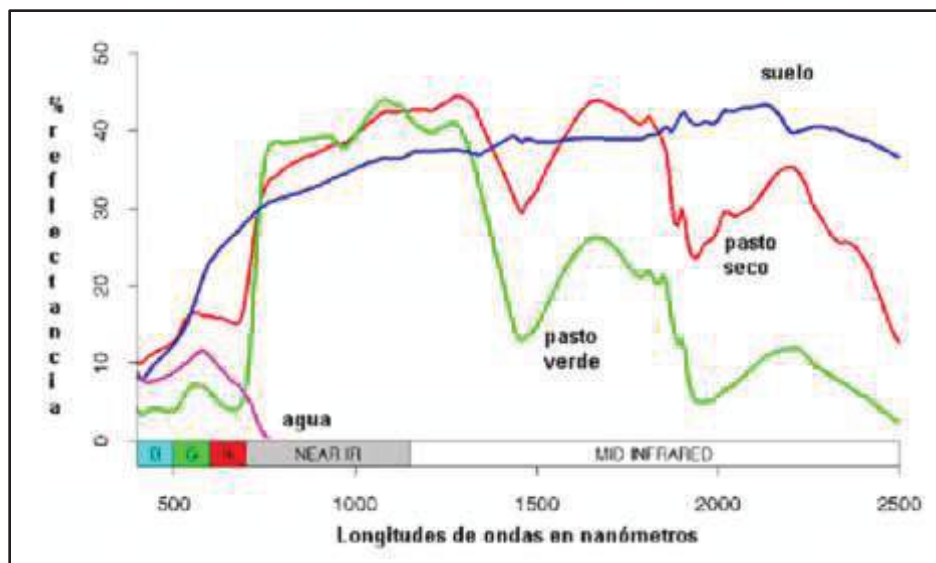
La variación de la reflectancia, en función de la longitud de onda, se denomina firma o signatura espectral. La firma espectral es, por ende, la medida cuantitativa de las propiedades espectrales de un objeto en una o varias bandas espectrales. Gracias a estas propiedades, es posible identificar y

cuantificar la naturaleza de un objeto o sistema mediante imágenes satelitales (Drozd & Fernández, 2016).

Ahora bien, la reflectancia (R) de una superficie se define físicamente como el cociente entre la potencia de la radiación reflejada y la potencia total recibida por esta (Paz-Pellat, 2018). Dado que la cantidad de radiación reflejada por la superficie siempre será menor o igual que la potencia recibida, la reflectancia tendrá valores comprendidos entre 0 y 1. Es usual expresarla en porcentaje.

Al comprender el tipo de radiación, la longitud de onda y el uso de las bandas de los sensores, se obtienen las firmas espectrales para cada tipo de elemento u objeto. Cuando se utiliza la clasificación para vegetación, normalmente se implementan las bandas del espectro visible e infrarrojo cercano, puesto que, gracias a este último, en combinación con la banda roja (visible), se identifica con mayor facilidad la vegetación sana; es decir que el comportamiento de estas dos bandas es diferente si se encuentra en un área determinada con vegetación densa o en crecimiento.

En la Ilustración 2 es evidente el comportamiento de las diferentes coberturas; en teoría, cada clase u objeto tiene una firma espectral particular, lo que contribuye a la identificación de cada categoría al momento de clasificar.



**Ilustración 2.** Curvas espectrales teóricas para diferentes coberturas terrestres; Fuente: NASA.

### **1.8.2 Aplicación de la percepción remota para análisis de suelos**

En este contexto, Cornejo-Denman (2017) realizó un análisis de la estructura, composición y función de la vegetación ribereña de zonas áridas, y su relación con los principales usos del suelo en Sonora, en la subcuenca río San Miguel; para ello utilizó imágenes de alta resolución obtenidas por drones e imágenes de resolución moderada de Landsat 8 OLI (Operational Land Imager).

En dicho análisis concluyó que el aumento de las actividades humanas asociadas al cambio de uso de suelo aumenta la perturbación en los ecosistemas ribereños del río San Miguel. Identificó también que 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, como la agricultura y las actividades recreativas, con mayor intensidad que en el resto de los lugares. El uso de plataformas aéreas (drones) permite el análisis detallado de la vegetación y facilita la descripción desde una perspectiva paisajística.

Autores como Mendoza y Dirzo (1999) detectaron una reducción de la cobertura vegetal natural de la selva Lacandona en un periodo de 17 años. Los autores le atribuyeron esta pérdida de cobertura a la tala ilegal, pues las zonas de mayor afectación fueron aquellas en las que se facilitó la accesibilidad.

Finalmente, Vega, López y Manzo (2008) utilizaron imágenes de satélite Landsat ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), para la elaboración de cartografía de vegetación y uso del suelo del Corredor Biológico Chichinautzin, en Morelos, integrado por el Área de Protección de Flora y Fauna Chichinautzin y por los parques nacionales Lagunas de Zempoala y El Tepozteco. Realizaron una clasificación supervisada, cuyos resultados fueron validados con puntos de referencia obtenidos mediante trabajo de campo e interpretación de fotografías aéreas digitales con una resolución espacial de dos metros. La clasificación visual se estableció mediante una matriz de confusión que calculó la precisión comparando las categorías finales de vegetación y uso del suelo con nuevos puntos de referencia.

### **1.8.3 Cambio de uso de suelo**

En 2013, Romo-León definió como cobertura vegetal a los tipos de vegetación natural presentes en una zona, estos pueden ser bosque, mezquital, matorral, vegetación ribereña, etc., por lo que el uso de suelo se interpreta como el “tipo de aprovechamiento que el ser humano realiza sobre una extensión territorial determinada, por ejemplo: industrial, urbano, agricultura, etc.” (Valdez-Zamudio et al., 2000); por consiguiente, la referencia hacia ambos conceptos se interpreta como cobertura de suelo (Jensen, 2005).

Los cambios en la cobertura de suelo constituyen un fenómeno que se ha incrementado de manera acelerada, a nivel mundial, en las últimas décadas (Lambin et al., 2003). Este hecho se da por diversos factores, como el incremento de las actividades económicas, humanas e industriales o la variabilidad climática, lo que trae como consecuencia afectaciones a los ecosistemas (Wilson et al., 2003).

Las alteraciones en los tipos de cobertura vegetal son el reflejo de la exposición de un sistema a eventos adversos, antropogénicos o ambientales, que dificultan su capacidad de reestablecer su funcionamiento natural (Lambin, 2003). Las consecuencias de esta serie de cambios en el sistema suponen pérdida de biodiversidad del sitio y degradación del suelo, así como incremento en la dificultad de obtención de recursos para el desarrollo de las actividades productivas (Lubchenco et al., 1991).

Conviene distinguir que las actividades humanas tienen un impacto considerable en la diversidad biótica en todo el mundo, en el clima global y local, en los ciclos biogeoquímicos, en la degradación y calidad del suelo, en la hidrología, en la seguridad alimentaria y en el bienestar humano (Foody, 2002).

## **2. Hipótesis**

La actividad humana y la variabilidad climática estimulan cambios en la distribución espacial y temporal de la cobertura del suelo, modificaciones que pueden ser detectadas mediante la percepción remota.

## **3. Objetivos**

### **3.1 Objetivo general**

Identificar el cambio de uso de suelo en la región Ures- Molino de Camou y los efectos sociales derivados de las actividades antrópicas.

### **3.2 Objetivo específicos**

1. Analizar el cambio de cobertura de suelo de los años 2010, 2014 y 2018.
2. Identificar los efectos sociales ocasionados por el cambio y uso de suelo.
3. Cuantificar los valores económicos de las actividades antrópicas antes, durante y después de los cambios de la cobertura de suelo.



## 4. Metodología

Con el fin de cumplir con los objetivos del presente trabajo, se generaron cuatro mapas temáticos de clasificación de cobertura de suelo en el área Molino de Camou-Ures, de los años 2010, 2014, 2016 y 2018. Esta clasificación tiene como fin identificar el cambio y extensión de la cobertura de suelo en cada año. Una vez obtenidos los mapas temáticos, se procedió a realizar un análisis de cambio de cobertura de suelo. A continuación, se describe y desarrolla el procedimiento realizado para llegar al objetivo esperado.

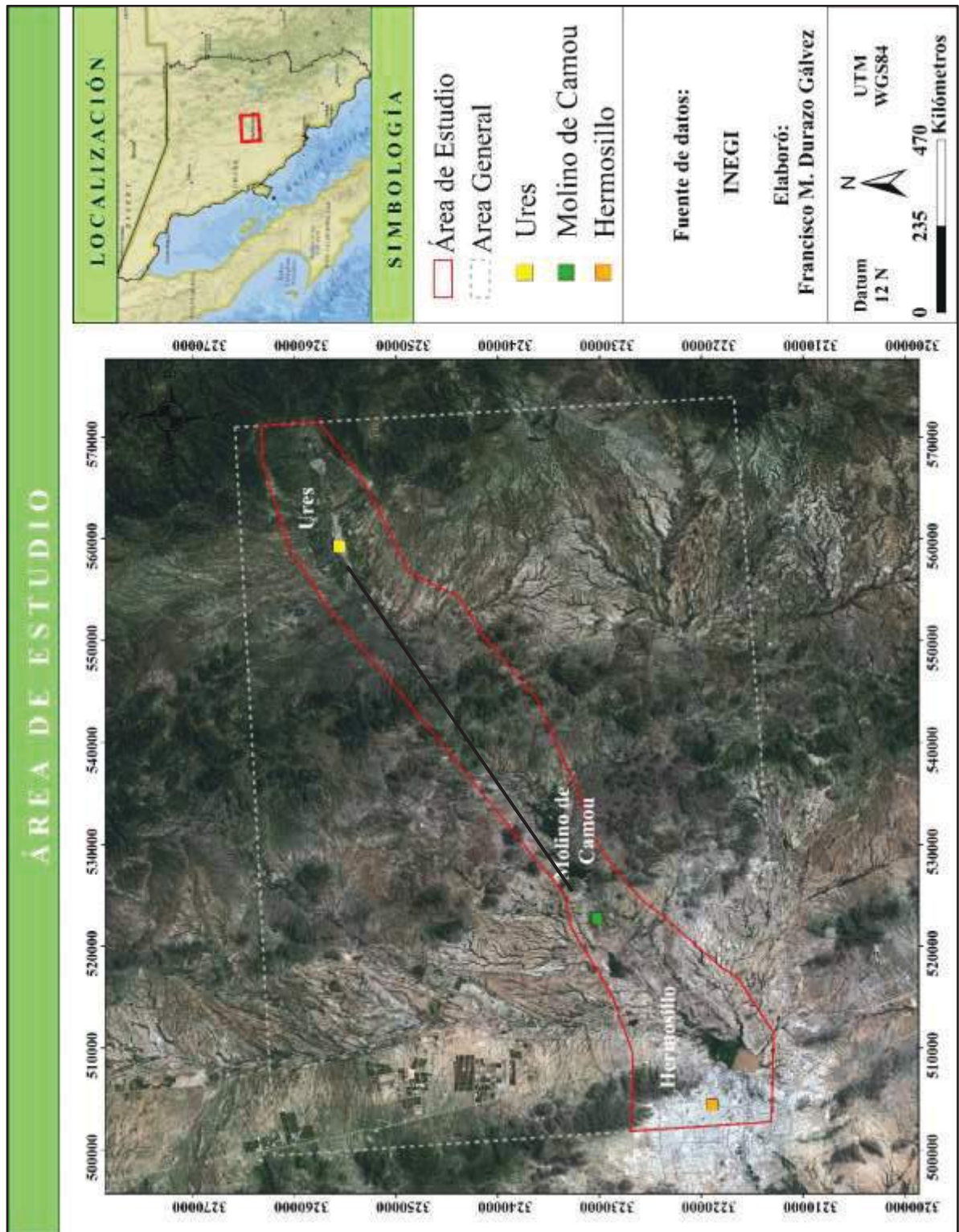


Ilustración 3. Etapas del proceso para la clasificación.

#### **4.1 Área de estudio**

El área de estudio se ubica en las coordenadas geográficas 29°28'10" y 29°6'44" Norte y 111°0'0" y 110°16'50" Oeste, tiene una extensión de 760 km<sup>2</sup> y comprende las riberas del río donde se realizó el levantamiento de datos, comprende las localidades de Ures y Molino de Camou, con una distancia en línea recta de 40 km.

El área general como se puede ver en el Mapa 4 tiene una extensión de 3,560 km<sup>2</sup>. La clasificación se ejecutó de dos formas: primero, se consideró el área de estudio de donde se tomaron los datos, y luego se tuvo en cuenta el área general. En el caso de los cálculos estadísticos de verificación de resultados, solo se consideró el área de las riberas.



**Mapa 4.** Área de estudio; Elaboración propia.

## 4.2 Ubicación de sitios mediante SIG

Antes de realizar el levantamiento de datos en campo, se llevó a cabo un recorrido virtual por la zona de interés mediante Google Earth Pro, con el propósito de identificar algún cambio de vegetación. Con esta herramienta se ubicaron algunos puntos de cultivos y otros puntos al azar, para cubrir la mayor extensión posible y tener una guía al momento de salir a campo. Los criterios utilizados al seleccionar los puntos de interés, previo a la salida de campo, fueron:

- Cubrir la mayor extensión posible (Ures-Molino de Camou).
- Ubicación de puntos en ambos lados del Río Sonora.
- Ubicación de puntos donde se presente algún cambio de color o textura.



**Ilustración 4.** Sitios seleccionados; Fuente: Google Earth, 2016.

### 4.3 Obtención de imágenes satelitales

El método utilizado para la clasificación es el supervisado, para ello, debe recurrirse a un muestreo de sitios representativos de coberturas conocidas, llamadas áreas o sitios de entrenamiento, que permitan compilar una firma espectral para cada cobertura de interés. Por eso es importante obtener imágenes satelitales con resolución espacial alta o moderada.

Se utilizaron imágenes satelitales de Landsat 5 TM (Thematic Mapper), Landsat 8 OLI y Sentinel 2A de los años 2010, 2014, 2016 y 2018. Cabe aclarar que se seleccionaron estos satélites debido a la resolución espacial y temporal, y a su acceso gratuito. En la Tabla 11 se muestran las imágenes adquiridas y sus fechas.

**Tabla 11.** Fechas de adquisición de imágenes Landsat y Sentinel.

Fecha de adquisición	Satélite
23 de agosto 2010	Landsat 5 TM
9 de agosto 2014	Landsat 8 OLI
15 de agosto 2016	Landsat 8 OLI
8 de agosto 2018	Sentinel 2A

El Landsat 5 TM fue lanzado en 1984 y finalizó su trayectoria en 2013; este satélite cuenta con siete bandas con una resolución espacial de 30 metros y temporal de 16 días. El Landsat 8 OLI se lanzó en 2013, y tiene una resolución espacial de 30 metros y temporal de 16 días, además, está compuesto por 11 bandas, de las cuales una es pancromática con una resolución de 15 metros. Por último, Sentinel 2A se lanzó en 2015, contiene 13 bandas y una resolución espacial de 10 metros y temporal de 10 días. En la Tabla 12 se sintetizan las características de cada satélite (USGS, 2019).

Estas imágenes fueron seleccionadas por abarcar toda la zona de estudio, por contener una mínima cobertura de nubes, y fundamentalmente por la contigüidad de las fechas entre las imágenes, lo que ayudó a establecer la menor separación temporal posible.

**Tabla 12.** Características de satélites utilizados; Fuente: USGS, 2019.

Satélites	Landsat 5 TM		Landsat 8 OLI		Sentinel 2 <sup>a</sup>		
Inicio	1 de marzo 1984		11 de febrero 2013		23 de junio 2015		
Finalizó	5 de enero 2013		-		-		
Altura	705 km		705 km		786 km		
R. Tiem.	16 días		16 días		10 días		
R. Esp.	30 y 60 m		15, 30 y 100 m		10, 20 y 60 m		
No.	B	Longitud (nm)	B	Longitud (nm)	Bandas	Longitud (nm)	R. Espacial (m)
B1	Azul	450-515	Coastal Aerosol	430-450	Coastal Aerosol	443	60
B2	Verde	525-605	Azul	450-510	Azul	490	10
B3	Rojo	630-690	Verde	530-590	Verde	560	10
B4	NIR	775-900	Rojo	640-670	Rojo	665	10
B5	SWIR 1	1550-1750	NIR	850-880	NIR 1	705	20
B6	Térmico lejano	10400-12500	SWIR 1	1570-1650	NIR 2	740	20
B7	SWIR 2	2080-2350	SWIR 2	2110-2290	NIR 3	783	20
B8			Pancromática	500-680	NIR 4	842	10
B9			Cirrus	1360-1380	NIR 5		60
B10			TIRS 1	10600-11190	Vapor de agua	940	60
B11			TIRS 2	11500-12510	Cirrus	1375	20
B12					SWIR 1	1610	20
B13					SWIR 2	2190	20

Las bandas que se utilizaron para este análisis corresponden a la parte visible del espectro electromagnético, es decir, la banda rojo, verde y azul (RGB); también se consideró la banda del infrarrojo cercano para el cálculo del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI, por su nombre en inglés Normalized Difference Vegetation Index).

#### 4.4 NDVI

El NDVI es un índice de vegetación que se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, con base en la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. Para este cálculo, se implementan las operaciones de coeficientes de bandas.

Cuando se va a realizar esta operación, se requiere la información que se encuentra en las bandas roja e infrarroja (NIR, por los términos *near infrared*). Así, se aplica la siguiente operación que permite identificar el estado de la vegetación (Bravo-Peña & Castellanos-Villegas, 2013):

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{Rojo})}{(\text{NIR} + \text{Rojo})}$$



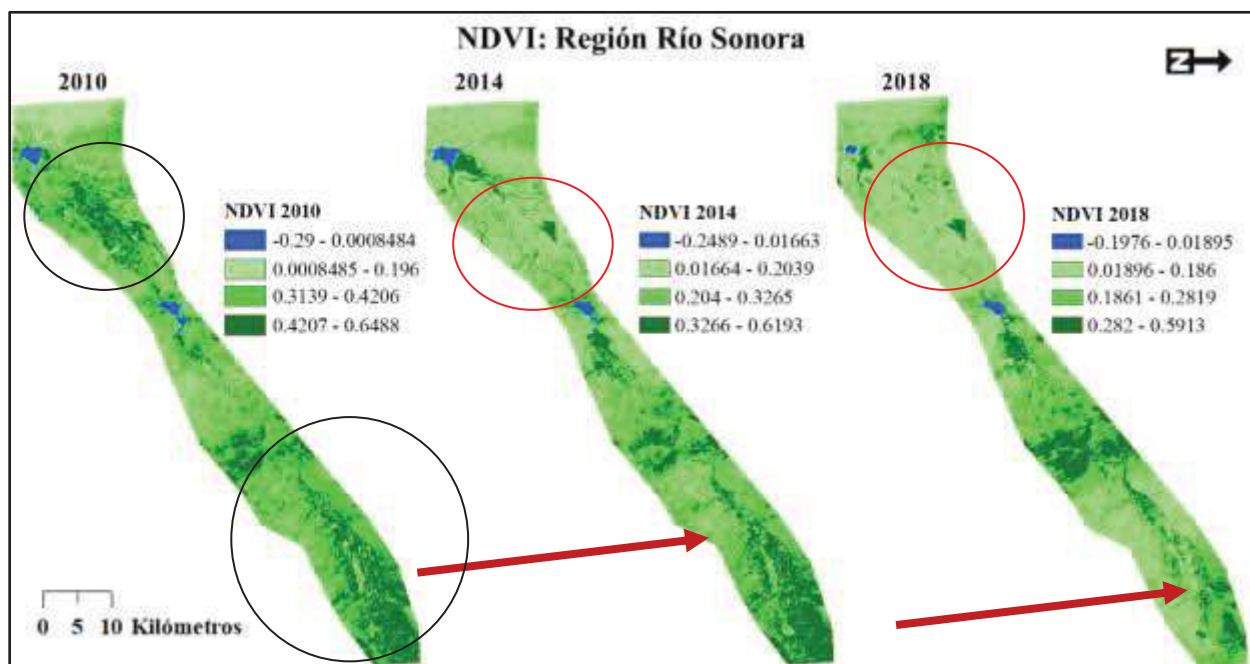
**Ilustración 5.** NDVI; Fuente: Martínez-Barbáchano y Solís-Miranda, 2018.

En la Ilustración 5 se ve el comportamiento de las bandas (rojo e infrarrojo), las flechas representan la respuesta de cada planta, es decir, cuando una vegetación es saludable (verde), el infrarrojo y rojo tienen respuestas totalmente diferentes, dado que el infrarrojo representa un 50 % de reflectancia, mientras que la banda visible (rojo) solo el 8 %. En cambio, cuando una vegetación está muerta (tono café), el comportamiento de respuesta de cada banda será similar, para el infrarrojo 40 % y en el caso del rojo un 30 %.

El rango de valores que se obtiene como resultado de la operación anterior está entre -1 a 1; cuando los valores son más cercanos a 1, significa que hay una vegetación saludable, y los valores de 1 representan cuerpos rocosos. En cambio, cuando los valores son más cercanos a -1, se entiende

que existe una vegetación muerta o sin verdor (Martínez-Barbáchano y Solís-Miranda, 2018). Estos comportamientos de las bandas permiten tener un primer acercamiento a las condiciones de vegetación en el área de interés.

En el área de estudio elegida en este proyecto se tiene como resultado el Mapa 5, en donde se identifica que en 2010 había mayor presencia de vegetación sana en Ures y en localidades cercanas a Hermosillo (círculo negro). En 2014 se observa una disminución considerable de vegetación sana en la zona de Hermosillo y en Ures presenta poca disminución. Por último, en el caso de 2018, en Ures se nota claramente una disminución significativa de la vegetación sana.



**Mapa 5.** NDVI: Región Río Sonora; Elaboración propia.

Además de observar las condiciones de la vegetación, también se puede apreciar la evolución de las presas, por ejemplo, en el año 2018 se registró menos almacenamiento en la presa Abelardo L. Rodríguez.

Con estos resultados del NDVI para la zona de estudio, es posible concluir, de manera general, que a lo largo del tiempo se ha perdido área de vegetación sana, en términos de lo que indica este índice.



#### 4.5 Toma de datos en campo

Las salidas de campo se realizaron en 2016, en el marco del proyecto de investigación “Diálogos entre la ciencia innovadora y las políticas públicas por la seguridad hídrica en las regiones áridas de las Américas” de El Colegio de Sonora.

Hubo un total de cinco salidas de campo, como se señala en la Tabla 13, tanto para verificar los tipos de vegetación presentes, como para constatar los usos de suelo determinados por medio de Google Earth. Se cartografió buena parte del sistema de presas Molino de Camou y Abelardo L. Rodríguez, El Gavilán y el municipio de Ures, donde se cotejaron un total de 135 puntos de cinco clases (Matorral desértico, Matorral subtropical, Vegetación ribereña, Mezquital y Suelos desnudos). Los puntos levantados fueron tomados con un GPS (Garmin) y las clases de Agricultura, Zona urbana y Cuerpo de agua se identificaron por medio de Google Earth.

**Tabla 13.** Levantamiento en campo 2016.

Salida	Lugar visitado	No. de sitios
1era.	Sistema de presas	24
2da.	Ures	22
3era.	Ures	20
4ta.	Puerta del Sol	11
5ta.	Ures, Gavilán, Presas	21

Es preciso añadir que en una de las salidas de campo se encontró un deterioro en el ecosistema de vegetación ribereña, pues sobre el cauce del Río Sonora, aproximadamente en una distancia de 1 km, se contó un total de 189 especies de *Populus* (álamos) –estas se hallan en la clasificación de la vegetación ribereña– y de ellas 185 se estaban muertas (ver Anexo fotográfico).

Para determinar el motivo por el que murieron estos álamos, es necesario realizar un análisis químico en las plantas; se supone, entonces, que esta modificación se debe a los siguientes factores:

- Escasez de agua o sequía.
- Calidad de agua (presencia de metales pesados).
- Condiciones del suelo (sedimentos con concentraciones de metales).

Para cada sitio se tomaron coordenadas geográficas y fotografías de los cuatro puntos cardinales, se registraron especies de flora presentes y observaciones generales, y se determinó el tipo de clasificación basado en el criterio propuesto por Anderson (1976). Este esquema de Anderson tomó en cuenta una combinación de criterios fisionómicos, al agrupar especies de vegetación en una clase representativa, lo cual fue de gran ayuda para identificarlas en determinada área y asignarlas al grupo al que pertenecían. En la Tabla 14 se resume la descripción de cada clase.

**Tabla 14.** Criterio para clasificación de clase; Fuente: Anderson et al., 1976.

ID	Clave	Clase	Descripción	Cantidad
1	AG	Agricultura	Cobertura de suelo que presenta áreas cultivadas.	36
2	MZ	Mezquital	Vegetación caracterizada por la predominancia de especies de leguminosas, como las de género <i>Prosopis</i> y <i>Acacia</i> . Se pueden encontrar en regiones de planicie, entre las colinas de elevación pequeña de la zona. Esta clase alberga individuos de las coberturas subtropical o espinosa, pero con menor presencia.	16
3	MD	Matorral desértico	Vegetación compuesta por plantas suculentas y generalmente espinosas, la integran árboles y subarbustos acaules, como <i>Agave lechuguilla</i> , <i>Oxalis stricta</i> , <i>Fouquieria splendens</i> , entre otras especies.	36
4	CA	Cuerpo de agua	Cobertura de suelo que cuenta con presencia de agua durante la mayor parte del año.	2
5	ZU	Zona urbana	Cobertura de suelo con presencia de residencias urbanas.	2
6	SD	Suelo desnudo	Extensión de terreno en la cual no se encuentra vegetación aparente.	7
7	RÑ	Vegetación ribereña	Vegetación arbórea localizada en los márgenes del cauce del río o sobre este. Se caracteriza por la presencia de especies que requieren condiciones de humedad favorables ( <i>Populus</i> o <i>Baccharis</i> ). En esta clase se pueden presentar individuos del género <i>Prosopis</i> con una altura mayor a los 5 m.	23
8	SB	Matorral subtropical	Vegetación conformada principalmente por arbustos o árboles bajos y espinosos. Los géneros que más se observan son <i>Ipomoea</i> , <i>Bursera</i> y <i>Acacia</i> , entre otras especies. Este tipo de cobertura se presenta como transición ecológica.	13
<b>TOTAL</b>				<b>135</b>

## 4.6 Preclasificación

Al obtener los sitios de interés o de entrenamiento (ROI, por su nombre en inglés Region of Interest) para la clasificación, se tuvieron que procesar previamente las imágenes adquiridas, es decir, aplicar la corrección atmosférica. Para este proceso y para la clasificación se utilizaron los softwares ENVI 5.1, IDRISI y ArcGis 10.4. Estos programas son de gran utilidad para el preprocesamiento, procesamiento, posprocesamiento y evaluación de resultados.

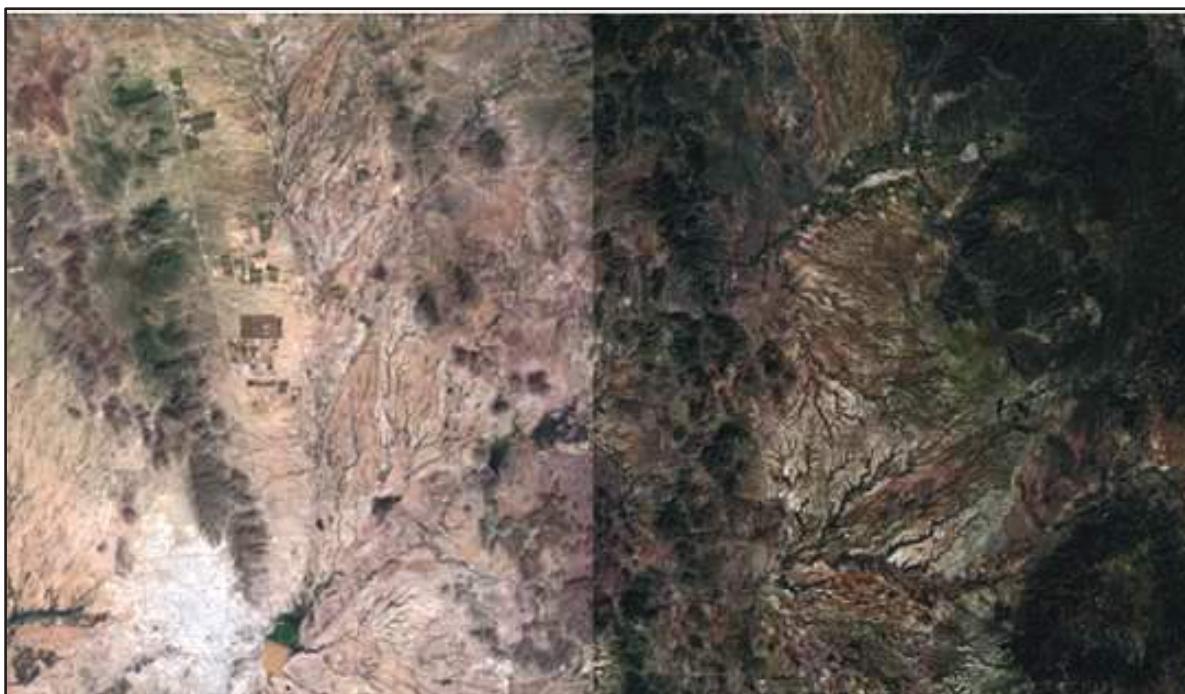
### 4.6.1 Corrección atmosférica

La corrección atmosférica busca recuperar la radiancia propia del objeto de estudio, obtenida de la señal recibida por el sensor. Para que una imagen satelital esté en condiciones adecuadas, se requiere procesar la imagen mediante la aplicación de algunas correcciones, como lo son la radiométrica y la atmosférica. Los datos que vienen almacenados en la imagen (Landsat, Sentinel o cualquier otra), son valores o Niveles Digitales (ND). Estos ND no representan de manera directa ninguna variable biofísica (clima, temperatura, relieve o humedad) y, por tanto, no se puede obtener ningún índice espectral utilizando valores “crudos” (Aguilar-Arias et al., 2014).

Los índices espectrales fueron desarrollados para trabajar con valores de reflectancia espectral de la superficie terrestre (que van de 0 a 1), y los ND no proporcionan dicha información. En consecuencia, hay que convertir los ND en valores de reflectancia, un proceso que se realiza en dos etapas y con el software ENVI:

- 1) Convertir los ND de cada banda a valores de radiancia, esta etapa se conoce como calibración radiométrica.
- 2) Conversión de radiancia a reflectancia que se logra mediante FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes); dichos valores se representan en porcentaje o valores de 0 a 1 (Kruse, 2004). Esta etapa se conoce como corrección atmosférica.

En la Ilustración 6 se observa la comparación de una imagen Landsat en crudo (lado izquierdo) y una imagen Landsat con la corrección atmosférica (lado derecho), con esta corrección, además de convertir de ND a valores de reflectancia, se tiene una imagen de mejor calidad y se elimina el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor (Aguilar-Arias et al., 2014).



**Ilustración 6.** Comparación de imagen aplicando la corrección atmosférica;  
Fuente: Landsat OLI 8, agosto 2014.

Con el resultado de la corrección atmosférica se reconocen diferentes rasgos en la imagen, como son los cuerpos rocosos, la zona de cultivo, la zona con escasa vegetación, la zona urbana y las regiones ribereñas que sobresalen. Lo anterior se identifica a simple vista, es decir que la calidad de la imagen es mejor.

#### **4.6.2 Pansharpening**

A través de la herramienta Pansharpening o refinado pancromático en ArcGis es posible mejorar la resolución de las imágenes. La técnica permite utilizar como referencia la imagen pancromática de mayor resolución (15 m) y combinarla con el resto de las bandas de menor resolución (30 m), así se genera una nueva imagen multibanda a color y se conserva la máxima resolución. La

resolución de Landsat 8 corresponde a 30 m, y con esta técnica se obtiene una imagen multiespectral con la resolución de una banda pancromática, es decir, una imagen de 15 m de resolución.

Esta técnica se utilizó en las imágenes de Landsat 8 OLI de los años 2014 y 2016, debido a que Landsat 5 TM no cuenta con la imagen pancromática, y la imagen de Sentinel tiene una resolución de 10 m. En la Ilustración 7 se muestra el resultado del método utilizado, de lado izquierdo se tiene la resolución espacial de 30 metros, y de lado derecho el resultado al aplicar la herramienta *Pansharpening* teniendo una resolución de 15 metros. Cabe mencionar que, para utilizar esta técnica, es necesario realizar previamente la corrección atmosférica.

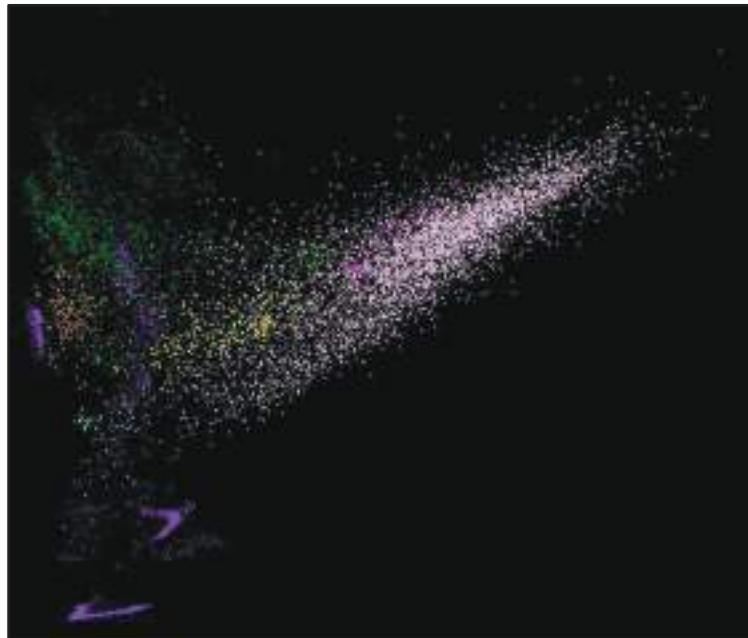


**Ilustración 7.** Comparación de resolución espacial;  
Fuente: Landsat OLI 8, agosto 2014.

### 4.6.3 Separabilidad espectral

El análisis de separabilidad indica qué tan consistentes, en términos estadísticos, son las áreas de entrenamiento seleccionadas, es decir, si son lo suficientemente independientes y diferenciables entre sí. Los valores de separabilidad oscilan entre 0 y 2, cuando estos son cercanos a 2 se reconoce una alta separabilidad, lo que significa que son excelentes para la clasificación.

Para las áreas de entrenamiento menores a 1.6 es necesario editar o seleccionar nuevas áreas, con el fin de obtener mayores valores de separabilidad, esto sugiere que la firma espectral es similar y podría presentar mayor error en la clasificación (PIADER, 2018).



**Ilustración 8.** Representación de la separabilidad espectral analizada de la imagen 2016; mediante ENVI.

El análisis de separabilidad se realizó utilizando ENVI 5.1, con la imagen y los ROI. Para este caso, al inicio se contaban con 11 diferentes tipos de cobertura, y al hacer el análisis espectral se obtuvieron valores de 0.234 de la cobertura Mezquital ribereño y Vegetación ribereña, por lo cual se procedió a fusionar esta categoría, y quedó el mezquital ribereño dentro de la cobertura Vegetación ribereña.

También la cobertura nogal y naranjo obtuvo valores de 1.230 y 1.014, respectivamente, la cual se confundió con la agricultura, por lo tanto, se agruparon en la clase de agricultura. En la Ilustración 8 se visualiza la separación espectral de las ocho clases utilizadas para esta clasificación. La imagen que se utilizó para este análisis es del año 2016, dado que en este año se realizó el levantamiento en campo, por lo que se procuró tener una mejor separabilidad espectral, antes de ejecutar la clasificación.

El software ENVI, además de presentar la separabilidad de manera ilustrativa, muestra los resultados en valores de 0-2, como se mencionó. En la Tabla 15 se evidencian los resultados del análisis espectral de las ocho clases utilizadas.

**Tabla 15.** Análisis de separabilidad espectral de las coberturas a clasificar.

<b>Separabilidad espectral</b>	<b>AG</b>	<b>MD</b>	<b>CA</b>	<b>ZU</b>	<b>RÑ</b>	<b>SD</b>	<b>SB</b>	<b>MZ</b>
<b>AG</b>		1.918	1.993	1.999	1.746	1.999	1.914	1.895
<b>MD</b>	1.918		1.995	1.998	1.889	1.996	1.882	1.963
<b>CA</b>	1.998	1.999		1.999	1.995	2	2	1.998
<b>ZU</b>	1.999	1.998	1.999		1.998	1.992	1.999	1.999
<b>RÑ</b>	1.746	1.889	1.996	1.999		2	1.991	1.723
<b>SD</b>	1.999	1.996	2	1.992	2		2	2
<b>SB</b>	1.914	1.882	2	1.999	1.991	1.999		1.977
<b>MZ</b>	1.895	1.966	1.998	1.996	1.703	2	1.977	

#### 4.7 Clasificación supervisada

La clasificación supervisada es un método que consiste en utilizar una base de datos obtenidos en visitas a campo, para clasificar los tipos de cobertura presentes en la superficie determinada. La principal ventaja de utilizar este método supervisado es que la clasificación resultante se logra con base en la información captada directamente del área de estudio. En ese sentido, provee mayor confiabilidad sobre el producto obtenido (Jensen, 2005).

Para ejecutar la clasificación se creó un archivo de firmas espectrales con la imagen a utilizar. Este archivo se elaboró mediante el uso de los ROI, y solamente se utilizaron la mitad de los sitios obtenidos para el proceso de clasificación, de modo que se pudiera usar la otra mitad para la matriz de confusión. A su vez, a los ROI se les dio el nombre de proceso y verificación. El “ROI

verificación” no se utilizó para la clasificación, pero sí para la evaluación de los resultados y el “ROI proceso” se empleó para la clasificación y evaluación de resultados.

#### **4.7.1 Maximum likelihood**

Este método es el más citado en la literatura y se utiliza en el proceso para la clasificación de imágenes satelitales. Dicho algoritmo de máxima verosimilitud se basa en dos principios: 1) las celdas en cada muestra de clases del espacio multidimensional que se distribuyen normalmente; 2) el teorema de Bayes de toma de decisiones.

La herramienta tiene en cuenta las varianzas y covarianzas de las firmas de clases cuando asigna cada celda a una de las clases representadas en el archivo de firma. Si se asume que la distribución de una muestra de clases es normal, una clase puede estar caracterizada por el vector del valor medio y la matriz de covarianza. Dadas estas dos características para cada valor de celda, se calcula la probabilidad estadística en cada clase, a fin de determinar la pertenencia de las celdas a la clase (ESRI, s/f).

#### **4.8 Posclasificación**

Con el resultado adquirido del proceso de clasificación se llevó a cabo un análisis visual del producto obtenido, comparándolo con los ROI utilizados para dicho proceso. Antes de aplicar los filtros finales del producto, se comprobó la confiabilidad del resultado mediante la matriz de confusión o de error y el coeficiente de concordancia, debido a que la clasificación se realiza obteniendo pequeñas muestras de la superficie, y de ahí se clasifica el resto de la imagen o escena.

##### **4.8.1 Coeficiente de concordancia (K)**

La exactitud total de una clasificación puede evaluarse a través del índice de concordancia de Kappa (K), una técnica discreta multivariada que determina estadísticamente si una matriz de error es significativamente diferente de otra (Congalton, 2004; Congalton & Kass, 1999; Richards, 2013).



Para determinar la exactitud de la clasificación realizada, Viera y Garret (2005) señalaron que el índice Kappa debe tener un valor mayor a 0.70, lo que indica una exactitud aceptable, por lo que las clasificaciones de los mapas generados se aproximan a las condiciones reales. De lo contrario, si el valor K es menor a 0.70, es preciso reconsiderar el procedimiento.

Este error de la clasificación se puede dar debido a la similitud de la firma espectral, y como ya se mencionó, antes de realizar la clasificación se debe considerar la separabilidad espectral, para que así el error sea menor y se obtenga una exactitud confiable en la clasificación. Se procuró hacer dicho ejercicio en este proceso.

#### **4.8.2 Matriz de confusión**

A la matriz de confusión se le conoce como matriz de error o de contingencia. Esta es una matriz cuadrada de  $n \times n$ , donde  $n$  es el número de clases. Adicionalmente, allí se muestra la relación entre dos series de medidas concernientes al área en estudio. La primera serie corresponde a datos de referencia adquiridos en campo, y la segunda a la categorización de los píxeles realizada por el clasificador para las clases de interés. En este estudio, para determinar la matriz de error se utilizó ENVI.

Luego, con la imagen o huella obtenida se procedió a obtener la matriz, mediante el uso de los “ROI proceso” y los “ROI verificación”; con estos dos archivos se realizó una combinación para determinar y evaluar el porcentaje de concordancia entre la clasificación obtenida y la superficie (Hall et al., 1991; Stehman-Stehman & Raymond-Czaplewski, 1998)

Con base en los resultados de la matriz de error se calculó el coeficiente K, esta herramienta utiliza la precisión global de la matriz, para así realizar una estimación del porcentaje de concordancia. Con la matriz de error también se obtiene información sobre la precisión del Productor (PP) y el Usuario (PU) y la precisión global (Congalton, 1991).

La Tabla 16 da cuenta de la abreviatura y número de cada clase; estas abreviaturas se utilizan más adelante, con el fin de facilitar la interpretación de los datos que a continuación se presentan. Por su parte, la Tabla 17 contiene los resultados en porcentajes del PP y UP para cada año, así como el porcentaje de la clasificación y el coeficiente de concordancia.

**Tabla 16.** Abreviatura de clase.

ID	Clave	Clase
1	AG	Agricultura
2	MZ	Mezquital
3	MD	Matorral desértico
4	CA	Cuerpo de agua
5	ZU	Zona urbana
6	SD	Suelo desnudo
7	RÑ	Vegetación ribereña
8	SB	Matorral subtropical

En la Tabla 17, se muestran los valores de porcentaje del PP y PU de cada cobertura de la clasificación generada de cada año. El PP se puede entender como el porcentaje de sitios que fueron clasificados correctamente en el mapa, y el PU se refiere a la interpretación de la persona; es decir que un píxel en el mapa corresponde a la misma cobertura en el terreno (Kepner et al., 2000).

**Tabla 17.** Valores de porcentaje del Productor (PP) y Usuario (PU).

Clase	2010			2014			2016			2018		
	PP	PU	$\bar{X}$	PP	PU	$\bar{X}$	PP	PU	$\bar{X}$	PP	PU	$\bar{X}$
AG	87.9	96.7	92.3	99.2	99.5	<b>99.3</b>	79.7	98.5	89.1	94.1	98.9	<b>96.51</b>
MZ	94.4	80.2	87.3	96.7	89.3	92.9	93.3	40.8	<b>67.5</b>	96.7	72.3	<b>84.5</b>
MD	98.7	90.4	94.6	100	95.8	97.8	100	98	<b>99.1</b>	100	92.5	<b>96.2</b>
CA	96.2	99.7	<b>98</b>	98.4	100	<b>99.1</b>	99.9	100	<b>99.6</b>	98.4	100	<b>99.2</b>
ZU	99.8	100	<b>99.9</b>	100	100	<b>99.7</b>	99.9	99.9	<b>99.8</b>	100	100	<b>99.97</b>
SD	93.1	68.3	<b>80.7</b>	100	100	<b>100</b>	96	98.9	97.535	92.2	100	96.08
RÑ	51.5	39.41	<b>45.48</b>	79.2	82.4	<b>80.82</b>	52.31	93.15	<b>72.73</b>	83.9	85.2	<b>84.5</b>
SB	100	70.37	<b>85.19</b>	100	95	97.5	100	56.72	<b>78.36</b>	100	100	100
<b>Precisión global</b>	87.6			86.3			96.4			92.6		
<b>Coefficiente Kappa</b>	0.78			0.84			0.946			0.913		

Para la clasificación hecha en este estudio, los resultados del coeficiente K son aceptables, pues muestran valores confiables del PP y PU. Para el año 2016, el coeficiente K tiene un valor de 0.946, superior a los otros años, lo cual constituye un valor aceptable y significa que los sitios utilizados representan mayor similitud en el mapa.

En cambio, en 2010 el valor es menor, lo que da a entender que los sitios utilizados en su mayoría no están representados como tal en el mapa, pues se presentó una mayor confusión en las clases, es decir que se cambió de cobertura. Sin embargo, el valor de 0.78 es aceptable.

Las coberturas mejor representadas en 2010 fueron: Cuerpo de agua y Zona urbana, siendo Vegetación ribereña, Matorral subtropical y Suelo desnudo las que presentaron mayor confusión. En el 2014, las coberturas mejor representadas fueron: Agricultura, Zona urbana, Cuerpo de agua y Suelo desnudo, en cambio, Vegetación ribereña presentó mayor confusión. En el caso de 2016, Matorral desértico, Cuerpo de agua y Zona urbana resultaron ser las mejores representadas, y las categorías Mezquital, Matorral subtropical y Vegetación ribereña aparecieron con mayor confusión.

Por último, las clases mejor representadas en 2018 se reflejaron en Agricultura, Matorral desértico, Cuerpo de agua y Zona urbana. Aquellas que evidenciaron mayor confusión fueron Mezquital y Vegetación ribereña, la cual presentó confusión en las cuatro escenas clasificadas. Conviene recordar que, en la separabilidad espectral, esta clase presentó mayor error con Mezquital ribereño, por lo que se procedió a fusionarla con esta categoría. Es notorio que al realizar de nuevo el análisis espectral, Vegetación ribereña haya tenido valores similares a Agricultura y Mezquital. A pesar de estos valores, los resultados del análisis espectral son aceptables para la ejecución de la clasificación; también se puede interpretar que la Vegetación ribereña experimenta un mayor cambio a lo largo del tiempo.

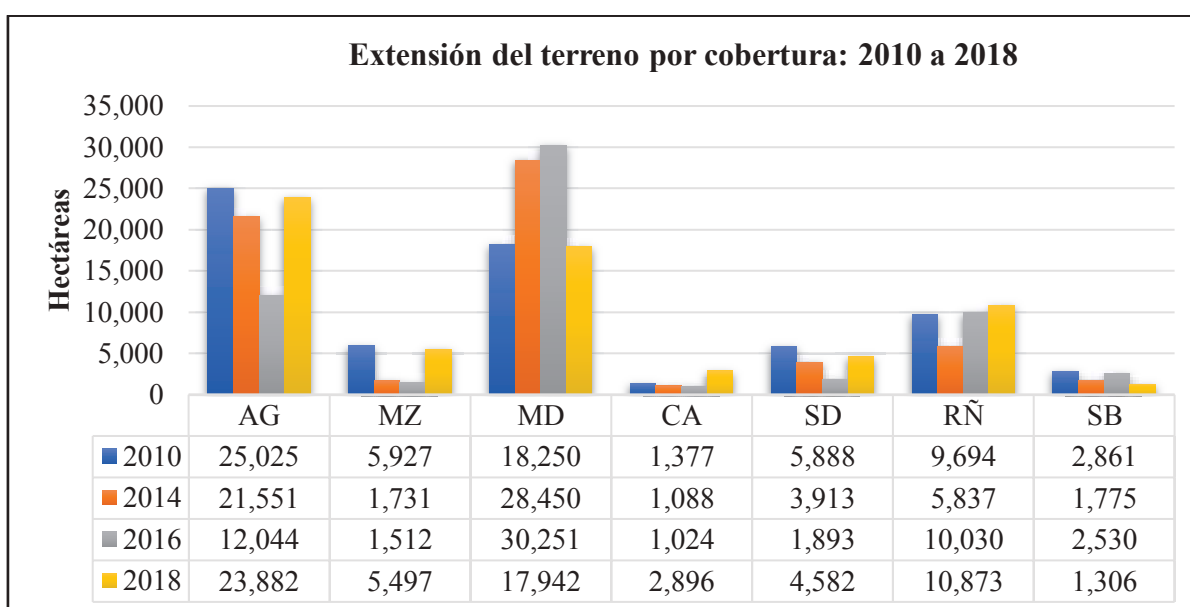
#### **4.9 Evaluación de cambio de cobertura de suelo**

Después de verificar que los resultados fueran confiables, se procedió a evaluar el cambio de cobertura del año 2010 al 2018. Esta evaluación de cambio de cobertura consiste en comparar los resultados obtenidos de la clasificación de un año con los registrados en una fecha posterior. Tal análisis ayuda a identificar sitios o píxeles que pertenecieron a una clase determinada y cambiaron su cobertura a otra, o bien mantuvieron la misma clase (Villarreal et al., 2012).

Se analizó, entonces, el cambio de 2010 a 2014, 2014 a 2018 y 2010 a 2018 –este último con el propósito de examinar el cambio de cobertura total en los ocho años– y con estos análisis se crearon matrices de cambio o de transición (Mas-Jean et al., 2004).

#### 4.10 Matriz de transición

Los cambios de la cobertura que llamaron la atención corresponden a las clases de Agricultura, Mezquitil y Vegetación ribereña. En la Gráfica 8 se observa el cambio de cobertura en el terreno (2010 a 2018), en donde la Agricultura presenta un comportamiento en declive del 2010 al 2016, y posteriormente se tiene una recuperación. Si este primer acercamiento se compara con datos oficiales, como ya se mencionó en otro apartado, se tiene que estos resultados tienen un coeficiente aceptable y coinciden con cifras oficiales. Estos cambios de cobertura se ven reflejados sobre todo en las localidades cercanas a Hermosillo y Ures.



**Gráfica 8.** Extensión del terreno por clase en cada periodo de clasificación.

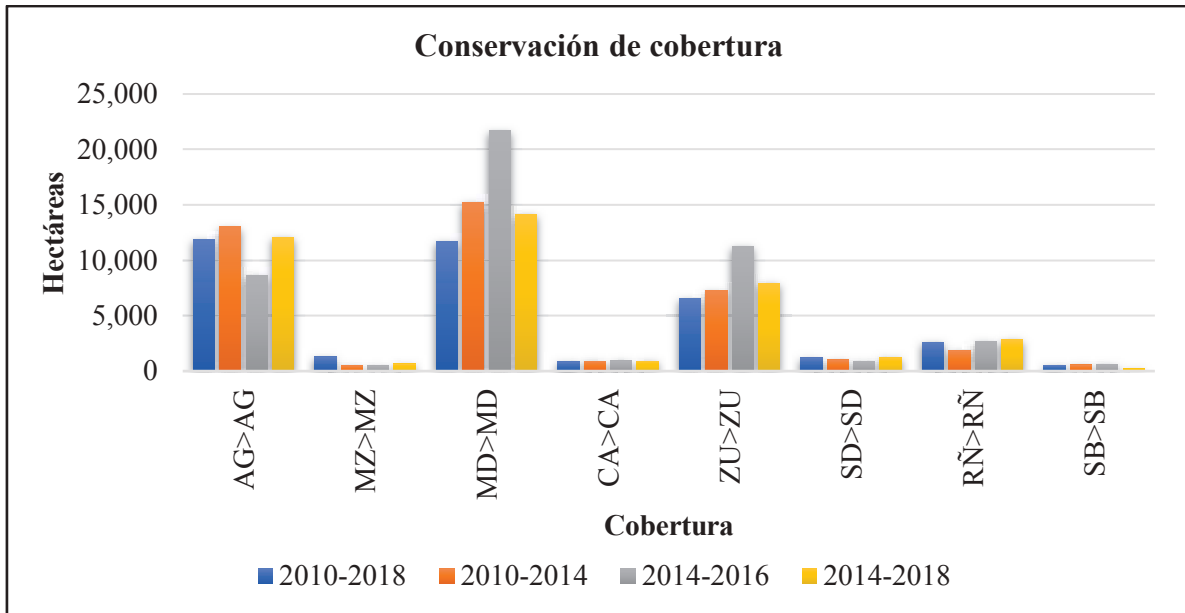
La Gráfica 8 se representa el cambio de cobertura a lo largo del tiempo, así, las preguntas que surgen son las siguientes: ¿Qué sitio se convirtió y en qué año cada cobertura presentó incremento o decremento? Para responderlas, se elaboró la matriz de cambio o de transición, en donde se observa claramente cuál categoría en hectárea dejó de ser tal para convertirse en otra, y qué cantidad de terreno permanece con la misma clase. En la Tabla 18 se muestran en forma diagonal (de color verde) las coberturas que se mantienen en el periodo evaluado; conviene aclarar que en esta ocasión la información corresponde a la matriz global de la clasificación de 2010 al 2018.

**Tabla 18.** Matriz de transición global de cobertura: 2010-2018.

Matriz de cambio de uso de suelo			Año 2018								Total
			AG	MZ	MD	CA	ZU	SD	RÑ	SB	
			1	2	3	4	5	6	7	8	
Año 2010	AG	10	11,858	933	2,746	435	1,532	2,127	5,109	285	25,025
	MZ	20	3,198	1,276	408	116	13	59	655	202	5,927
	MD	30	2,591	676	11,674	442	441	546	1,648	232	18,250
	CA	40	138	26	127	851	51	24	159	1	1,377
	ZU	50	485	5	120	65	6,515	368	180	1	7,739
	SD	60	1,592	81	1,501	92	903	1,199	501	19	5,888
	RÑ	70	2,275	2,254	1,201	894	328	149	2,569	24	9,694
	SB	80	1,745	246	165	1	0	110	52	542	2,861
<b>Total</b>			23,882	5,497	17,942	2,896	9,783	4,582	10,873	1,306	

La suma total por fila corresponde al total del año 2010 por cobertura, mientras que la suma por columna corresponde a las cifras de 2018. Estos resultados se obtuvieron después de convertir los ráster a polígono en ArcGis. En cada archivo shp (*shapefile*) se agregó una columna dándole valores de 1 a 8 (que están relacionados con la clase) y al otro archivo se le dieron valores de 10 a 80, sin dejar de lado la clave de la cobertura.

Después de asignar valores por año en cada archivo, se utilizó la herramienta *Intersect*, la cual intercepta las dos capas, teniendo como resultado otro archivo que conserva los valores antes asignados en cada columna. Así se obtuvo la matriz de transición para cada periodo.



**Gráfica 9.** Conservación de cada cobertura para cada periodo evaluado.

De esta forma, se calculó el área en hectáreas para cada combinación, y se reconocieron los cambios de clase (en anexo se tiene la matriz de 2010 a 2014, 2014 a 2016 y 2014 a 2018). En la Gráfica 9 se dio a conocer la cantidad de terreno que ha conservado la misma cobertura, y en ella, es de color azul la representación global.

#### 4.11 Indicadores para identificar los efectos sociales por el cambio de cobertura de suelo

Los efectos sociales derivados del cambio de cobertura de suelo en los municipios que conforman la cuenca del Río Sonora se determinaron mediante la información oficial disponible de SADER, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA), e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Se utilizaron dos indicadores para determinar los efectos sociales: 1) Producto Interno Bruto (PIB) y 2) Comportamiento poblacional. Para el primer indicador, se analizó los datos disponibles de producción de agricultura y ganadería de los años 2010 al 2016, para esto se consideró el volumen total de producción anual de la actividad pecuaria; el volumen total cosechado y sembrado de la agricultura, con estos datos se determinó el PIB con base a los precios de 2010.

Con este indicador (PIB) se pudo visualizar el comportamiento temporal-económico de la actividad pecuaria, y así determinar si el incremento o decremento económico de la región.

El segundo indicador utilizado fue el comportamiento demográfico de los municipios que conforma la cuenca del Río Sonora, esto para determinar si la migración está relacionada con el cambio de cobertura, junto con estas cifras poblacional, se documentó de manera hemerográfica alguna entrevista realizada a los habitantes de la región para determinar los motivos por el cual migran.

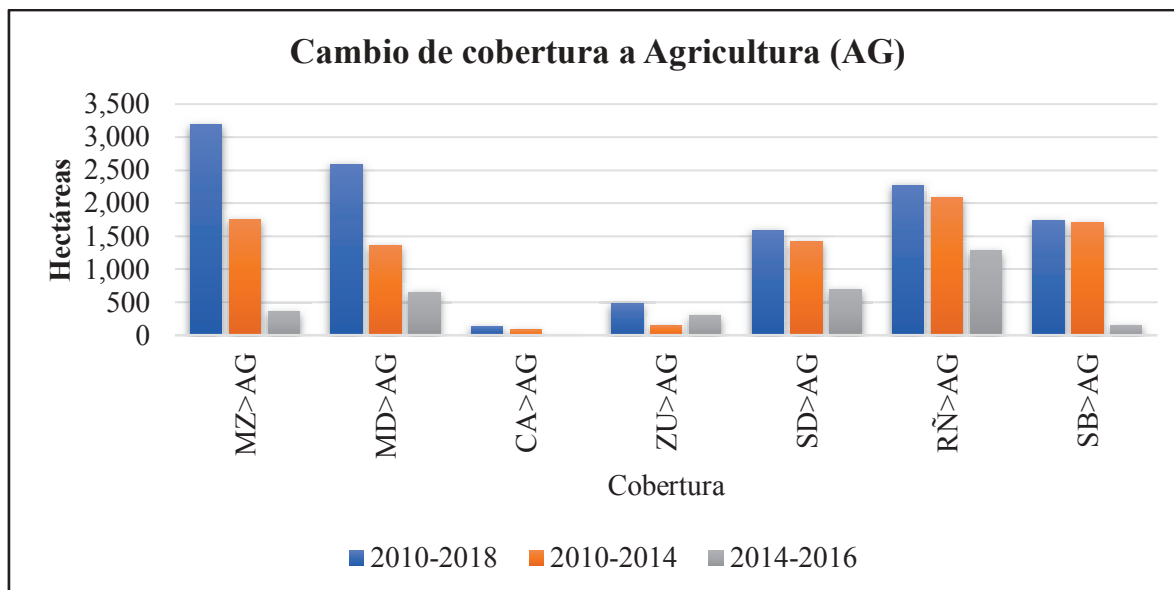
## **5. Resultados**

### **5.1 Evaluación de cambio de cobertura de suelo**

Con base en la información obtenida mediante la matriz de transición, se calculó el porcentaje de incremento y decremento de las coberturas Agricultura, Vegetación ribereña y Mezquital. Se seleccionaron estas clases, debido a que representan mayor transición, y con ello se pretende identificar la cobertura que cambió en cada clase seleccionada.

#### **5.1.1 Evaluación de cambio de Agricultura**

El cambio de las diferentes clases hacia la Agricultura se dio principalmente en Vegetación ribereña y Mezquital, en el periodo 2010-2014, lo que contribuye con un 8 % y 15 % respectivamente; en el intervalo 2014 a 2016, la clase de Vegetación ribereña aportó un 15 % en la categoría de Agricultura. Igualmente, en el periodo completo de estudio (2010 a 2018) las clases que más cambiaron a Agricultura fueron Mezquital y Matorral desértico, esto representa un 13 % y 11 % en contribución.

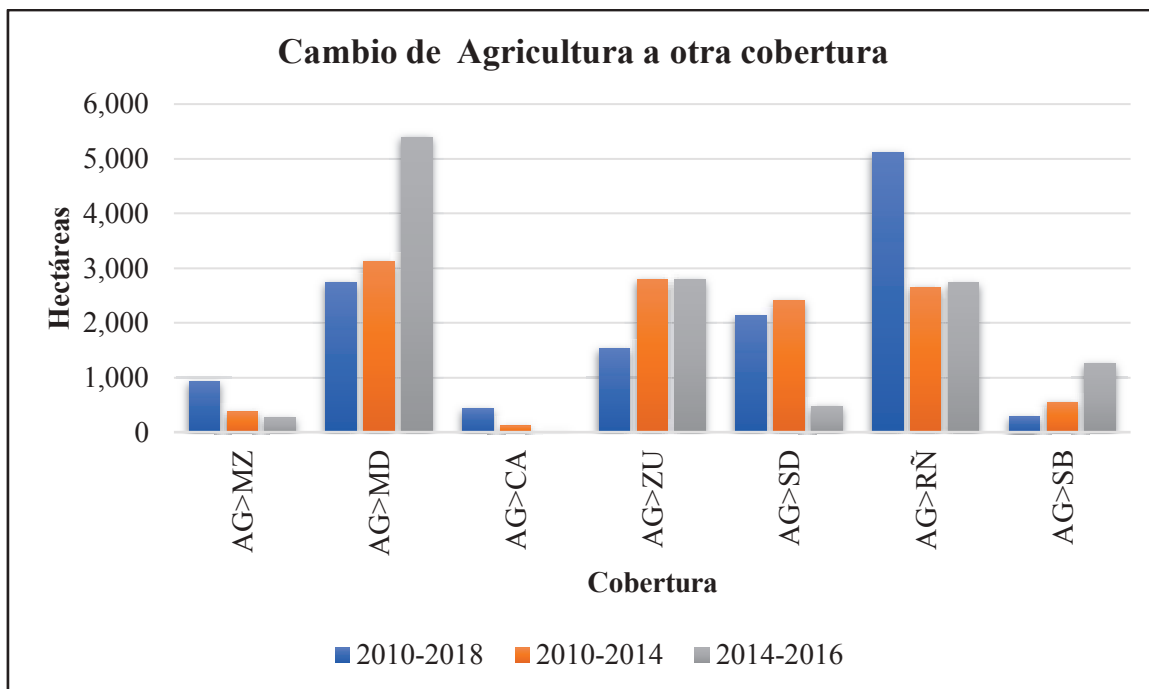


**Gráfica 10.** Incremento de la Agricultura por cada periodo.

También se analizó el cambio de la Agricultura a diversas clases, allí se encontró que para el intervalo 2010 a 2014 la Agricultura pasó a Matorral desértico y Vegetación ribereña, lo que representa un 12.5 % y 10.6 %, respectivamente.

En el periodo 2014-2016 se tuvo un decremento de la Agricultura, convirtiéndose a Matorral desértico y Vegetación ribereña, en un 25 % y 12.7 %. Finalmente, entre 2010 y 2018 se observó un decremento de Agricultura, ocupado por las coberturas de Matorral desértico y Vegetación ribereña (11 % y 20.4 %).



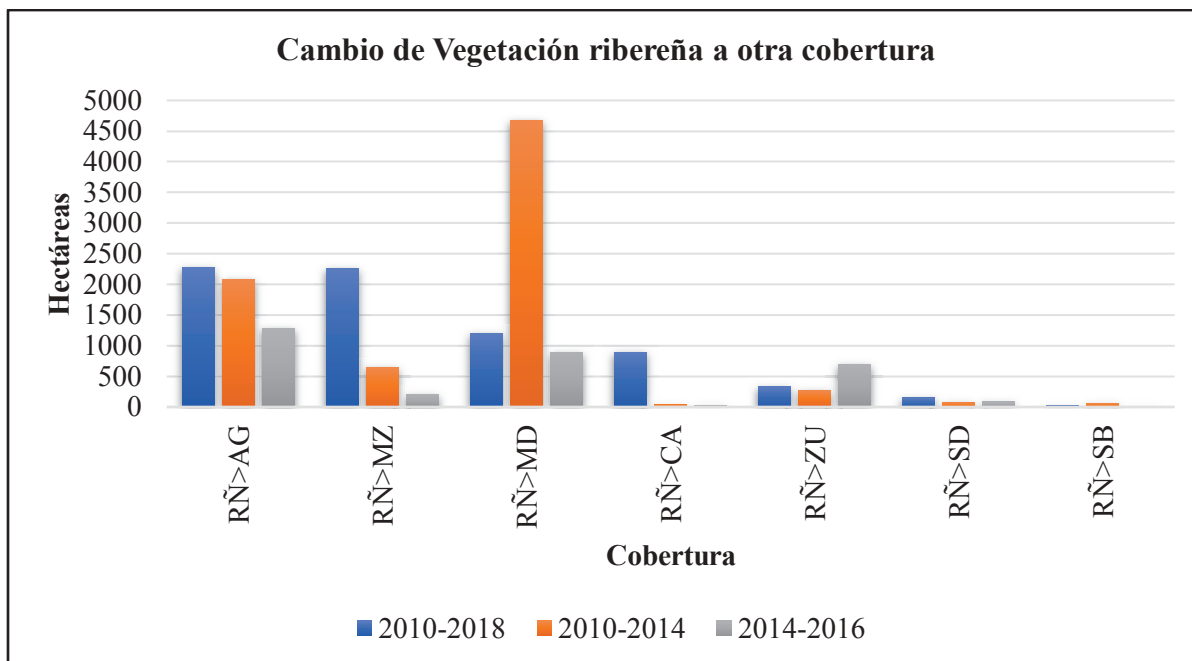


**Gráfica 11.** Decremento de Agricultura para los diferentes periodos.

Por lo tanto, para los diferentes periodos evaluados, la Agricultura en los años 2010-2014, ocupa mayor representación; posteriormente, en 2016 se observa un cambio significativo, siendo remplazada por Mezquital, Vegetación Ribereña y Matorral Desértico, en las regiones de la ribera del Río Sonora.

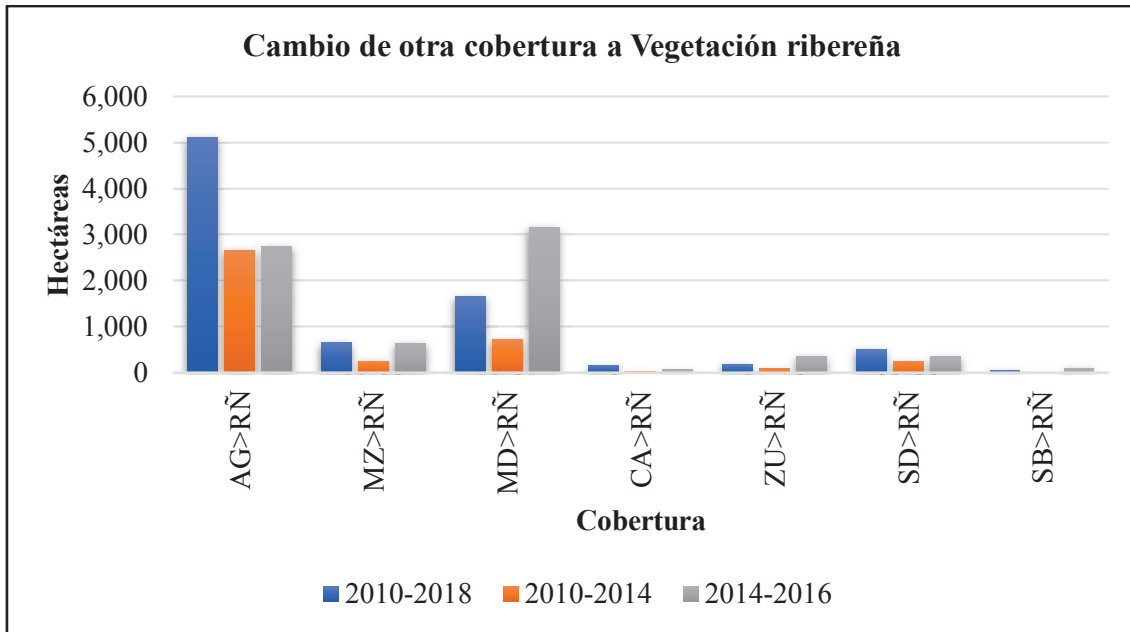
### 5.1.2 Evaluación de cambio de Vegetación ribereña

La transición de Vegetación ribereña se dio en su mayoría a Matorral desértico en el periodo 2010-2014, lo que contribuye con un 48.2 % en decremento; en los años 2014 a 2016 fue desplazada por la clase de Agricultura, y alcanzó un valor de 22 %. En un resumen global, del 2010 al 2018 se distingue una disminución de Vegetación ribereña de 48.8 %, representada en las clases Mezquital y Agricultura (25.5 % y 23.3 %, según corresponde).



**Gráfica 12.** Decremento de Vegetación ribereña por periodo clasificado.

El cambio de las diferentes clases hacia la Vegetación ribereña se manifestó, en particular, en Agricultura y Matorral desértico, en el periodo 2010-2014 y 2014-2016, con un porcentaje de cambio del 45.5 %, en cuanto a la Agricultura, y 31.5 % de Matorral desértico. A su vez, las clases que más cambiaron de 2010 a 2018 a Vegetación ribereña fueron Agricultura y Matorral desértico (47 % y 15.2 %).

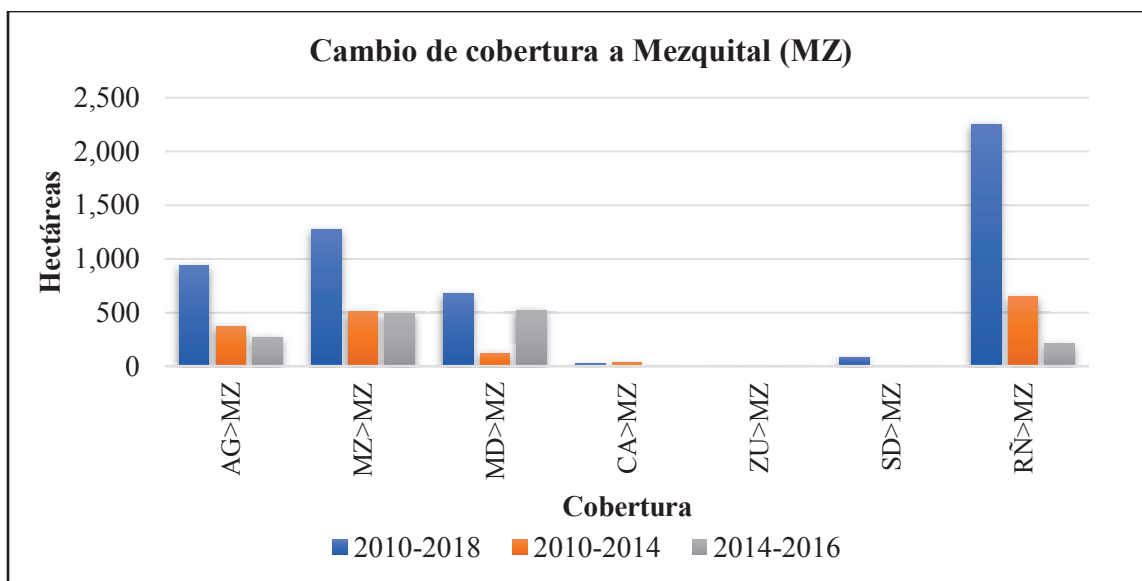


**Gráfica 13.** Incremento de Vegetación ribereña por periodo clasificado.

Por lo tanto, en el periodo de 2010-2014 se tiene un decremento considerable de Vegetación ribereña (48.8 %), la cual es remplazada por Matorral desértico, y de 2014 a 2016 alcanza el 77 % de superficie de cambio.

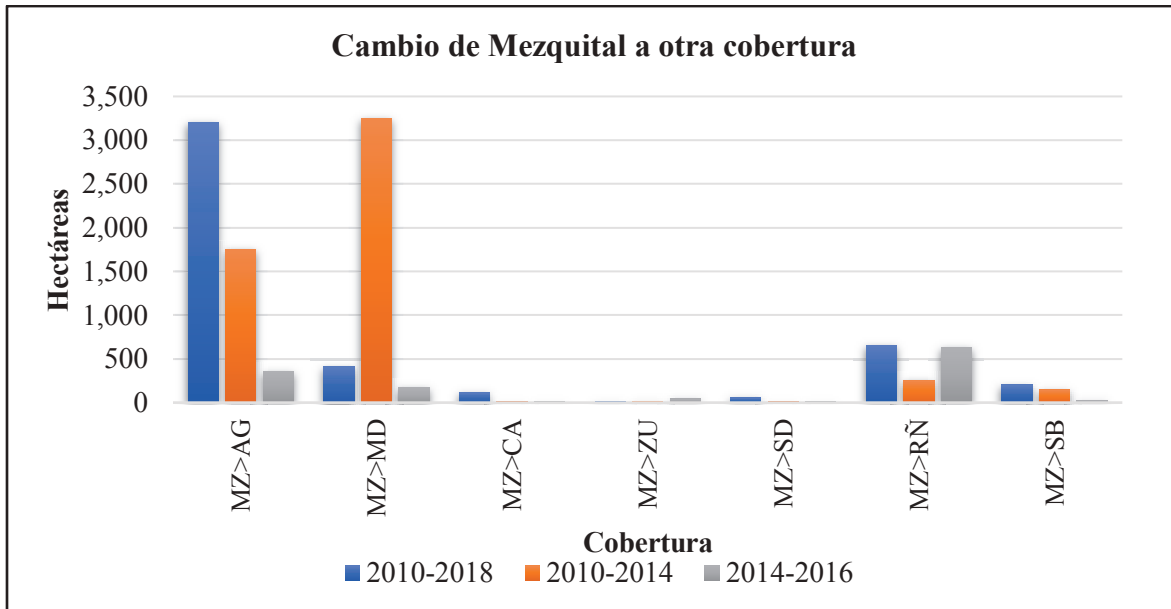
### 5.1.3 Evaluación de cambio de Mezquital

El incremento de Mezquital de 2010 a 2014 está representado por Agricultura y Vegetación ribereña, con 21 % y 37.3 %; mientras que para 2014 a 2016 la clase de Matorral desértico sufrió una transición de un 34.6 % y se convirtió en Mezquital. En el periodo completo de 2010-2018, las clases que más cambiaron a Mezquital fueron Agricultura (14 %) y Vegetación ribereña (41 %).



**Gráfica 14.** Incremento de Mezquital por periodo clasificado.

En la Gráfica 16 se puede observar que, en el periodo 2014-2018, la clase de Matorral desértico contribuye a la transformación en Mezquital, seguida de la Agricultura; sin embargo, de manera global la clase que tiene una mayor superficie de cambio a Mezquital es la Vegetación ribereña.

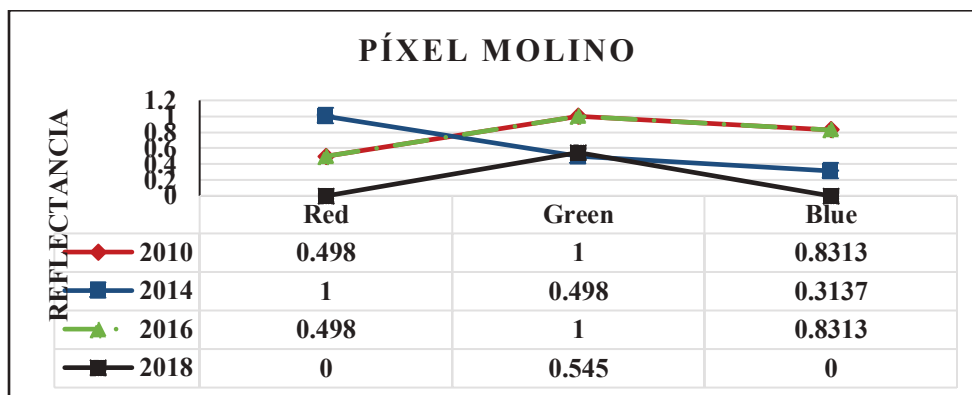


**Gráfica 15.** Decremento de Mezquital.

En este caso, el decremento global de Mezquital constituye un 54 %, representado por Agricultura. La transición de Mezquital se dio principalmente en Matorral desértico, en el periodo 2010-2014, lo que significa un 43 % de disminución. Con esta gráfica se puede concluir que las hectáreas de Mezquital son modificadas, en mayor medida, a zona de cultivos.

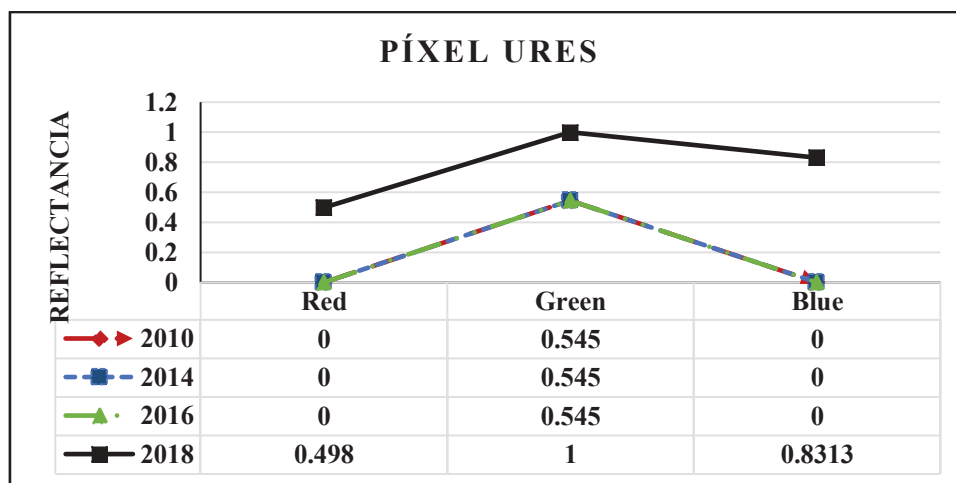
## 5.2 Análisis de píxel

Además de analizar el cambio de cobertura, se observó el comportamiento de los píxeles clasificados. Por ejemplo, en la Gráfica 18 se presenta un píxel de la imagen que pertenece al Molino de Camou, allí se puede apreciar que para 2010 y 2016 se tiene la misma clase –estos valores representan Vegetación ribereña–; mientras que en 2014 se observa un cambio a Mezquital y en 2018 a Agricultura.



Gráfica 16. Comportamiento de píxel en Molino de Camou.

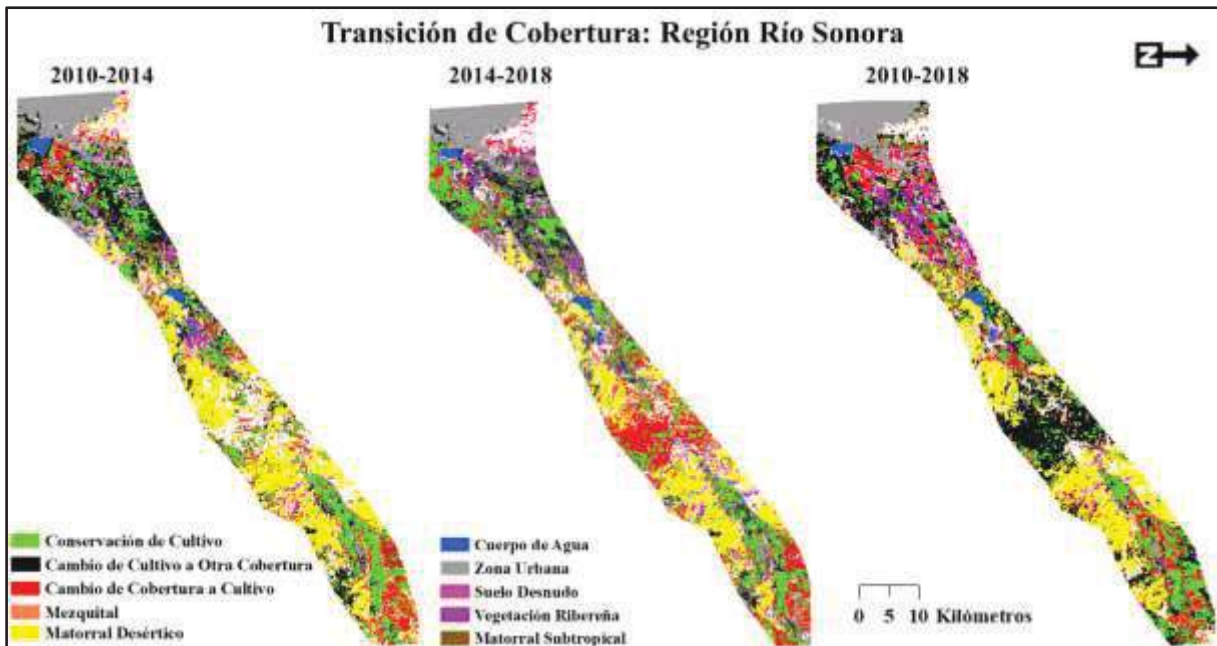
En el caso de Ures, el píxel seleccionado al azar, se observa un comportamiento constante de 2010 al 2016 en Agricultura; en 2018 esta clase cambia a Vegetación ribereña, como se evidencia en la Gráfica 19.



Gráfica 17. Comportamiento de píxel en Ures.

### 5.3 Efectos sociales en el cambio de uso de suelo en la región del Río Sonora

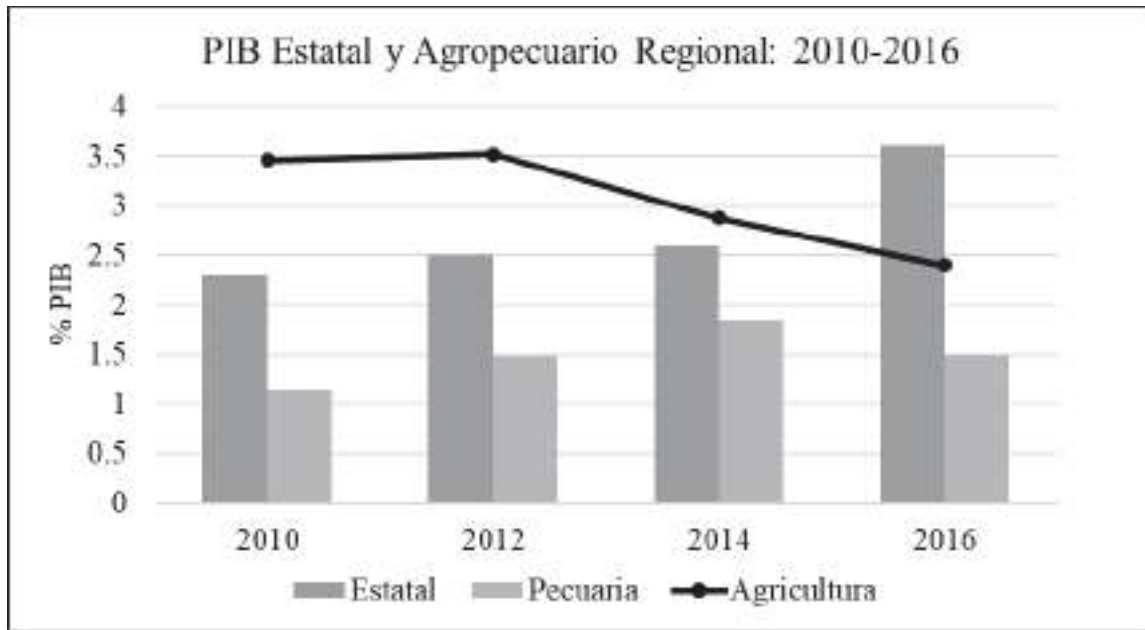
Después de obtener la clasificación supervisada y de analizar los resultados, mediante métodos estadísticos, e identificar la transición de las clases a lo largo del tiempo, se interpretó que las principales coberturas de suelo modificadas son: 1) Agricultura, 2) Mezquital y 3) Vegetación ribereña.



**Mapa 6.** Transición de cobertura: región Río Sonora; Elaboración propia.

De igual modo, se implementó la matriz de transición en los archivos de shp y se obtuvo el Mapa 6 de transición de cobertura, en donde se reconoce con facilidad el área de Agricultura que se ha conservado con el tiempo (verde limón), la Agricultura que se convirtió en otro tipo de cobertura (color negro), el cambio de cobertura a Agricultura (color rojo) y las áreas que se conservaron.

Estos cambios de Agricultura se observan especialmente en la zona de Ures y en cercanías a Hermosillo. Es pertinente recordar que la agricultura y la ganadería son actividades económicas importantes para la región; por lo tanto, al observar que se ha dejado de cultivar en la región, se interpreta que la economía se vio afectada. El sustento de tal aseveración está en las cifras oficiales de SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) que se exhiben a continuación.

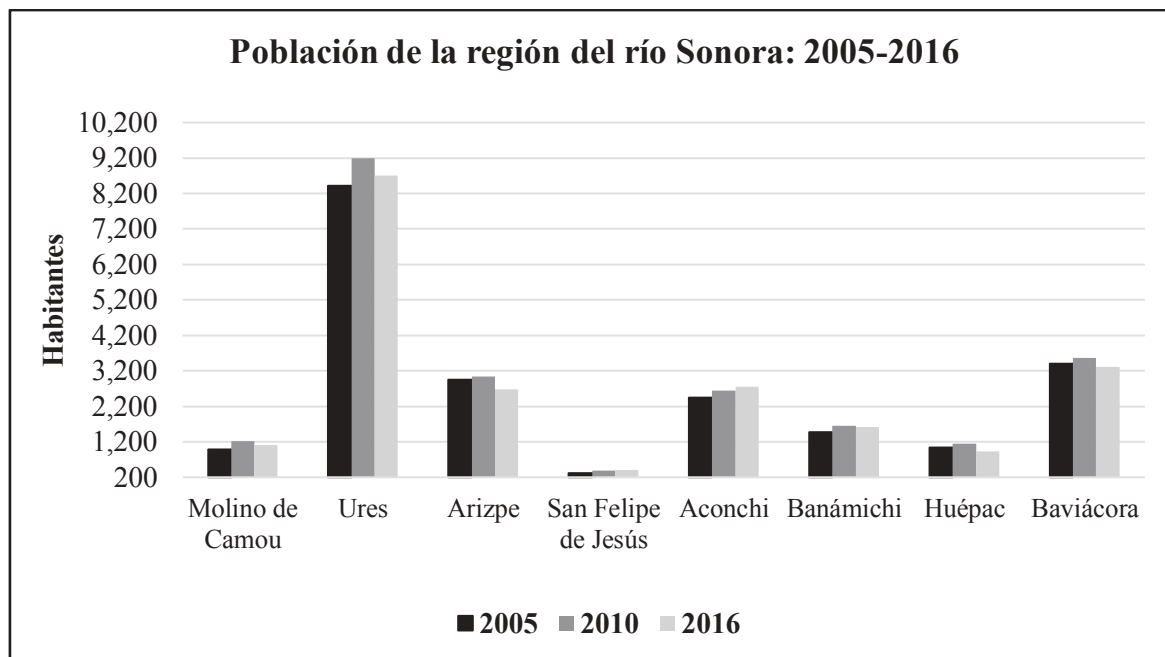


**Gráfica 18.** PIB Estatal y Agropecuario: 2010-2016; Fuente: SADER.

En estos seis años (2010 a 2016) algunos municipios tuvieron un poco de crecimiento positivo, como sucedió en Arizpe, Aconchi, Baviácora y San Felipe de Jesús; el resto de los municipios registraron crecimiento negativo, es el caso de Banámichi, Huépac y Ures, este último con la reducción más alta de casi el 30 %.

A la vez, en el apartado “Antecedentes de actividades antrópicas” se mencionó el comportamiento de la producción agrícola y ganadera de la región, y se concluyó que a partir de 2014 se observaba una disminución considerable en el volumen de producción. Al analizar los datos del PIB se obtuvo la Gráfica 10, en donde se observa un comportamiento de crecimiento a nivel estatal, de 2010 a 2016 (por periodos de 2 años); en cambio, para la región Río Sonora se tiene un decremento notable en 2014.



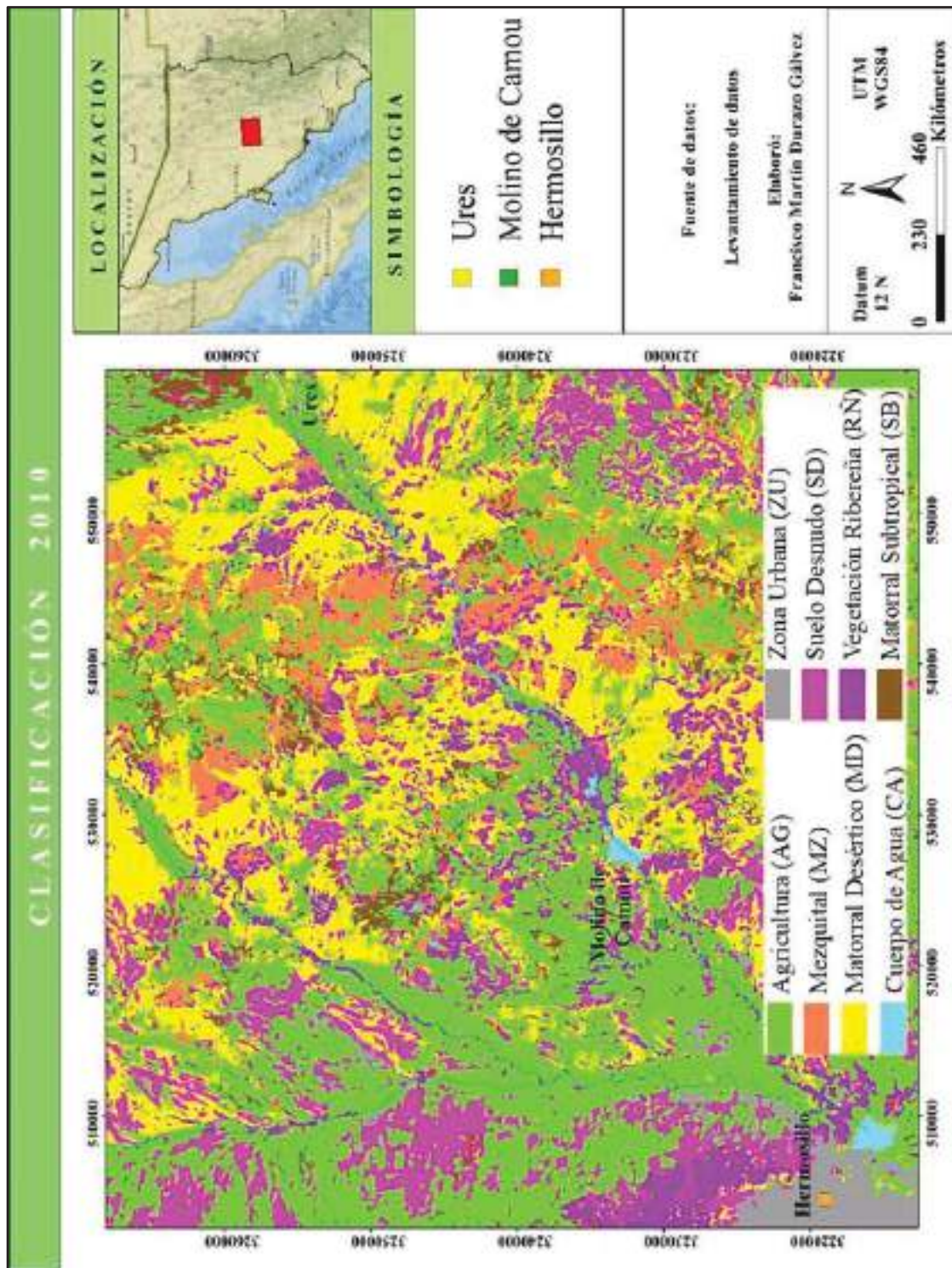


**Gráfica 19.** Población de la región del Río Sonora; Fuente: INEGI, 2016.

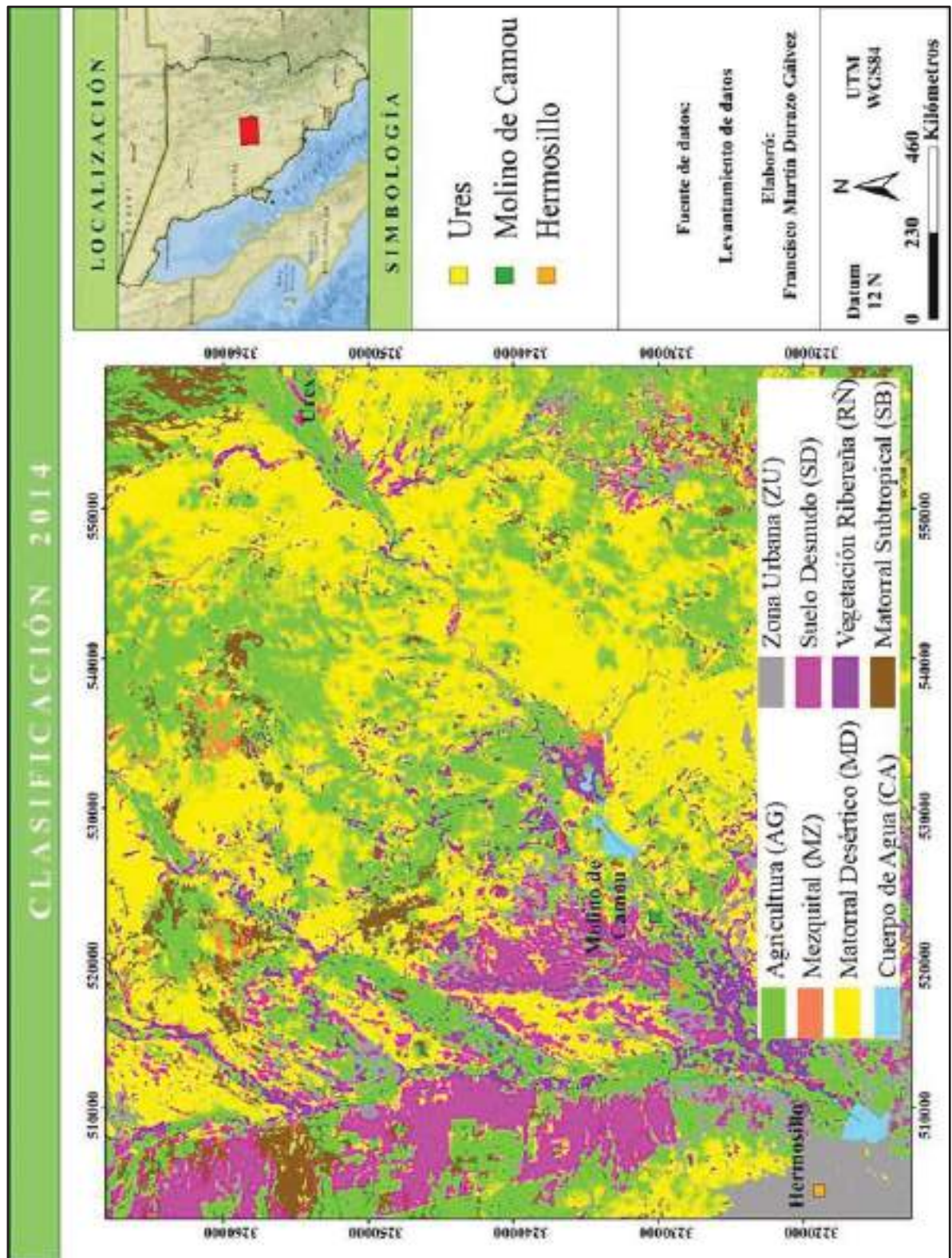
La migración, en este periodo 2010-2016, no está relacionada con salir de la comunidad a estudiar en Hermosillo, significa “salir a lugares cercanos para buscar trabajo, debido a la baja en la economía regional” (UNIRADIO, 2016). Quienes más migran son los jóvenes, puesto que no sienten motivación para quedarse en dicho lugar.

En la Gráfica 11 se muestra el comportamiento poblacional de las diferentes comunidades, de manera general, se observa un incremento poblacional de 2005 a 2010 del 8.2 %; sin embargo, de 2010 a 2016 hay una disminución de habitantes en las comunidades. Las comunidades que más presentan disminución en la población son: Molino de Camou, Ures, Arizpe, Banámichi, Huépac y Baviácora, a excepción de Aconchi y San Felipe de Jesús, donde aumentó la cifra en un 4.5 % y 2.8 %, respectivamente.

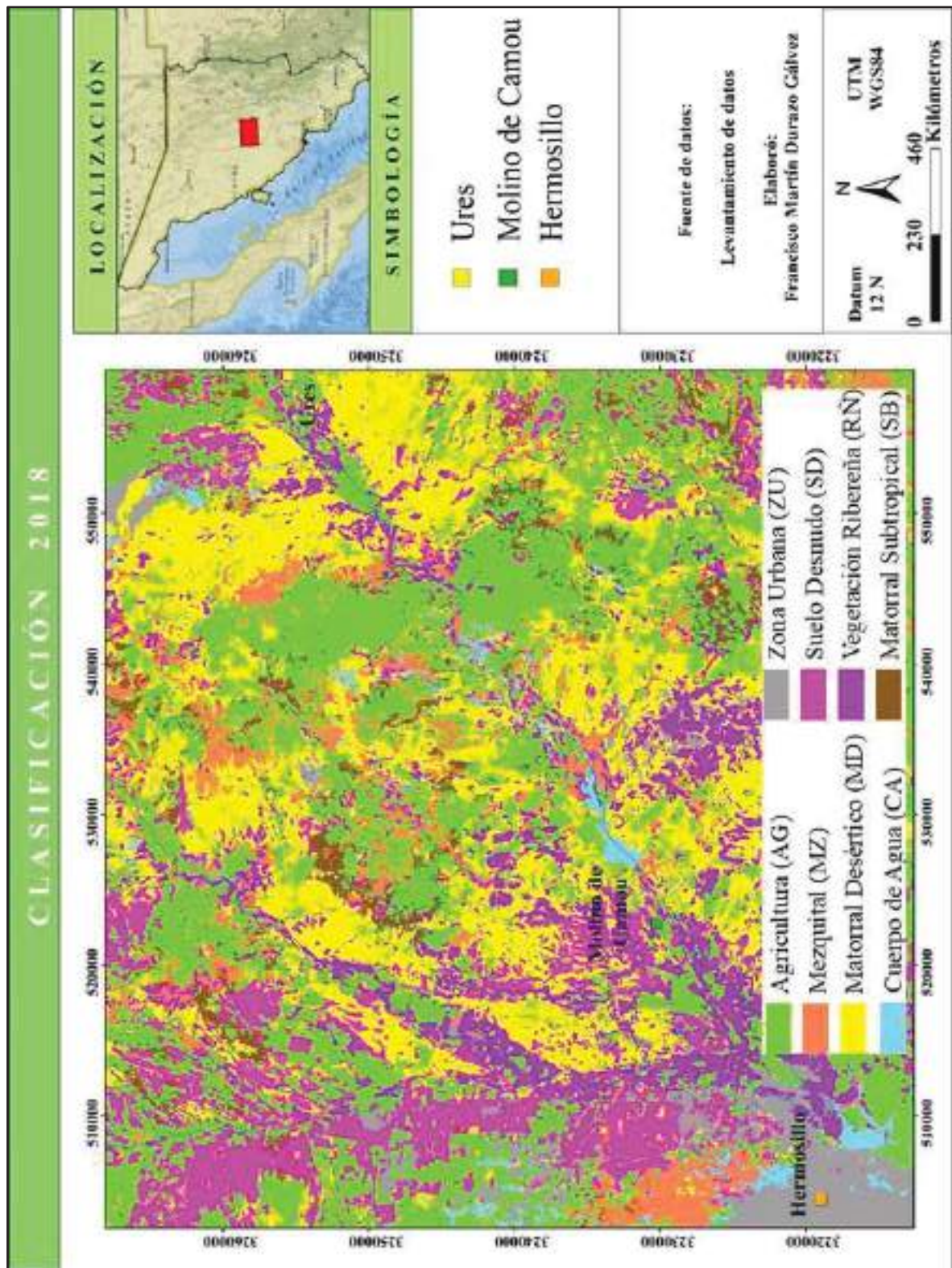
## 5.4 Mapas resultantes



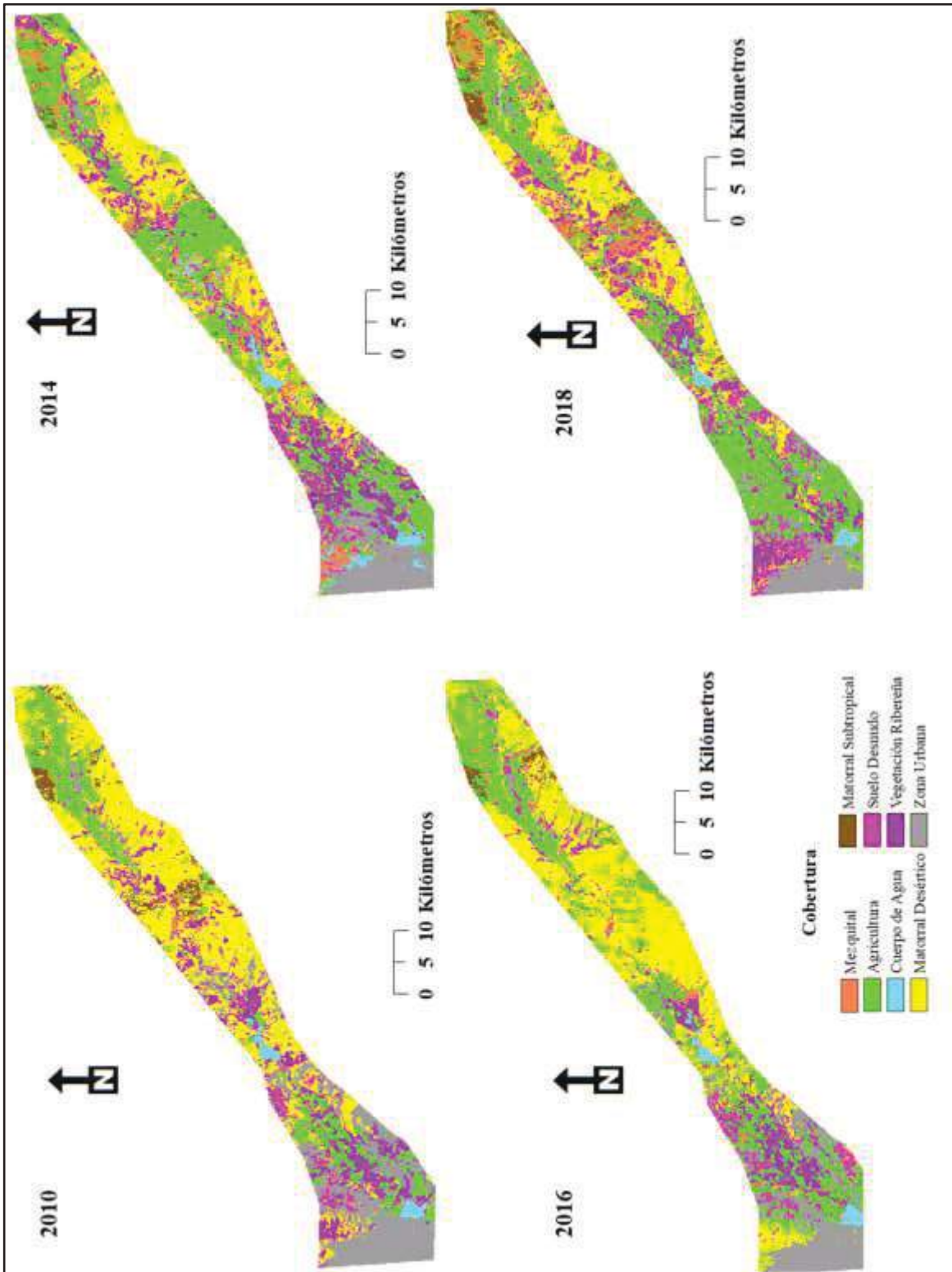
**Mapa 7.** Clasificación de cobertura vegetal en la región Río Sonora: Ures-Molino de Camou 2010.



**Mapa 8.** Clasificación de cobertura vegetal en la región del Río Sonora: Ures-Molino de Camou, 2014.



**Mapa 9.** Clasificación de cobertura vegetal en la región del Río Sonora: Ures-Molino de Camou, 2018.



**Mapa 10.** Resultado de clasificación del área de estudio por año evaluado.

## 6. Discusión

La situación del Río Sonora es compleja, debido a que ha ocurrido diferentes eventos, como el derrame minero, eventos climatológicos, la modificación del paisaje, entre otros. Algunos de estos acontecimientos han tomado tintes políticos, generando en algunas investigaciones sesgo de información. Gracias a la información y a los estudios disponibles (R. Díaz-Caravantes et al., 2016; Escoboza-Castillo, 2018; Ibarra-Barreras, 2018), ha quedado claro que la actividad minera supone una fuente económica importante y, a su vez, es un riesgo latente, tanto en el aspecto ambiental como social.

Cabe añadir que la calidad, tono y cantidad de información depende de quien la publique y de los intereses a preservar. Existen estudios que niegan rotundamente la contaminación del Río Sonora (Calmus et al., 2016; Rangel-Medina, 2019), al justificar que dicha situación se atribuye a las condiciones geológicas del terreno. En efecto, la cuenca presenta depósitos hidrotermales, eso es innegable, y por ello ha sido altamente explotada. En estos depósitos hidrotermales se encuentran presentes metales pesados como el As, Cd (cadmio), Hg, Cr (cromo), Pb, Cu, Al (aluminio), Fe, entre otros, los cuales presentan mayor riesgo para la salud humana (Ochoa-Landín., et al., 2011; Lodoño-Franco et al., 2016).

La discusión no se debe quedar en ese punto, debido a que estos estudios argumentan que la presencia de dichos metales se debe a miles de millones de años de formación, y expresan que no hay estudios previos al derrame para afirmar que existe una afectación en la cuenca a causa de la industria minera.

El cambio de cobertura de suelo en la región, como lo mencionaron diferentes autores (Bustamante-Icedo, 2016; Cornejo-Denman, 2017; Gandarilla-Aizpuro, 2015), se produjo por las actividades de origen antrópico e industrial que modifican el terreno. Además de estas modificaciones, durante el periodo evaluado (2010-2018) los resultados muestran que el evento antrópico y climatológico influye directa e indirectamente en este cambio de cobertura a corto y largo plazo, a escala local y regional, como se puede constatar en los datos económicos y agropecuarios, y en la clasificación obtenida.

Las modificaciones en el paisaje representan dinámicas complejas que dependen del tipo de cobertura, de las actividades antrópicas y de la situación socioeconómica y política de la región. Este decremento notable en el PIB es consecuencia del cambio de uso de suelo, dado que el área que era destinada para cultivo en Ures, y en localidades cercanas a Hermosillo, disminuyó en ese mismo periodo. En ese sentido, las preguntas que surgen son: ¿Qué ocasionó el cambio de agricultura? o ¿cuáles fueron las causas para que no hubiera producción y venta agropecuaria?

Para responder a la primera pregunta, de acuerdo con Luque y otros colaboradores (2019), se diría que la cobertura agrícola en la región del Río Sonora se vio afectada directamente por tres eventos, uno antrópico y dos climatológico: 1) El derrame de la mina Buenavista del Cobre, el 6 de agosto de 2014; y 2) el huracán Norbert, del 2 al 10 de septiembre 2014, y 3) el huracán Odile, un evento sucedido entre el 11 y el 19 de septiembre del mismo año. En palabras del autor:

“Los eventos climatológicos causaron graves inundaciones a lo largo del río, acarreado rápidamente los lixiviados tóxicos de concentrado de cobre río abajo, destruyendo los cultivos en las zonas ribereñas y expandiendo los contaminantes del derrame más allá del curso normal del río, incluso cubriendo los pozos de la zona ribereña” (Luque et al., 2019).

En torno a la segunda pregunta, es posible asegurar que debido a los eventos climatológicos se perdió la cosecha y no pudo ser vendida; además, los consumidores desconfiaban del producto por el derrame minero, y por ese motivo, bajaron las ventas y los agricultores dejaron de trabajar sus tierras. Así se confirma en los siguientes fragmentos:

“Ante este suceso y a la cobertura de la prensa, los productos regionales disminuyeron en demanda (queso, jamoncillos, obleas, chiltepín, etc.), que normalmente se venden en el centro de Hermosillo, por la desconfianza de los consumidores. También, algunos habitantes aledaños al río comenzaron a reportar reacciones atípicas en la piel.

Agricultores y ganaderos pronto se dieron cuenta de que sus productos no podían ser vendidos, incluso aunque estos se hubieran cosechado antes del derrame, afectando así la economía de toda la cuenca, desde Cananea hasta Hermosillo” (Luque et al., 2019).

Se reconoce así que los efectos económicos de la región están ligados al cambio de uso de suelo, ocasionado por estos dos eventos de carácter antrópico y climatológico. Este último ocasionó pérdidas de cultivo, mientras el primero generó una imagen negativa, en la que los consumidores desconfiaban de todos los productos de la región. Como consecuencia directa, se manifestó una baja en la economía regional y hubo migración en las comunidades.

Tan grande fue el impacto del derrame, que el Congreso del Estado de Sonora aprobó la Ley 178, la cual crea la “Zona Económica Especial para el Río Sonora” (Gobierno del Estado de Sonora, 2017). Este plan está contemplado de 2018 a 2032, con el propósito de reactivar la economía de la región.

Existe una discrepancia en las investigaciones del Río Sonora referente al impacto socioambiental, por el lado de las ciencias sociales manifiestan los daños y efectos ocasionados por las actividades antrópicas, ya que estos estudios analizando los daños a la salud humana, la amenaza a la vida acuática, la percepción de riesgo, la calidad de agua para el consumo humano, el comportamiento de la flora y fauna disponibles (R. Díaz-Caravantes et al., 2016; R. E. Díaz-Caravantes et al., 2018; Elizalde-Castillo, 2017; Escoboza-Castillo, 2018; Ibarra-Barreras, 2018) En cambio, en estudios científicos, exponen que no existe evidencia suficiente para determinar los daños ocasionados por las actividades industriales (Calmus et al., 2016; Ochoa-Landín et al., 2011; Rangel-Medina, 2019).

Por lo anterior, es necesario realizar investigaciones multidisciplinarias para poder tener una visión más amplia del problema. En la cuenca del Río Sonora se requieren investigaciones con metodologías participativas, es decir, generar información científica junto con la participación de la gente, ya que ellos, son los que viven y saben la situación social, ambiental, económica y cultural de la región.



## 7. Conclusiones

El cambio de uso de suelo es un reflejo de la interrelación del ser humano con el ambiente para este trabajo se enlistan algunos puntos como conclusión:

1. La aplicación de Sistemas de Información Geográfica permite realizar investigaciones de cambios de cobertura de suelo a bajo costo.
2. El cambio de cobertura de suelo tiene un impacto social, principalmente en las regiones donde se dedican a la actividad pecuaria.
3. Los indicadores (PIB y migración) permiten cuantificar el impacto del cambio de cobertura de suelo.
4. Existen dos principales eventos que generan el cambio de cobertura 1) climatológicos y 2) actividades antrópicas, siendo el primero con efectos a corto plazo y el segundo con efectos a mediano y largo plazo, como se puede constatar en las cifras oficiales.
5. En la región del Río Sonora los huracanes Norbert y Odile ocasionaron pérdidas en los cultivos, afectando a corto plazo la economía de los agricultores.
6. El evento antrópico ocurrido el 6 de agosto de 2014 ocasionó daños a mediano y largo plazo, afectando a los aproximadamente 22,000 habitantes de la región. Esto se puede corroborar con las cifras oficiales y las entrevistas realizadas a los pobladores. Dicho evento ha dificultado la venta de productos regionales. Hasta la fecha, a casi 6 años de lo ocurrido los pobladores aún no se pueden recuperar en términos económicos y esto ha ocasionado que la mayoría de los jóvenes migren a otras comunidades.
7. Es necesario seguir monitoreando el comportamiento económico y demográfico de la región para determinar los efectos ocasionados por las actividades antrópicas.

Con las herramientas de la percepción remota se identificaron los tipos de cobertura de la región para determinar el impacto social de los años 2010, 2014 y 2018. Se obtuvieron como resultado mapas temáticos para cada fecha, y se reconoció el cambio de clase global.

Los resultados obtenidos presentan una alta confiabilidad, con un valor del 96.4 %, para 2016, año en que se tomaron los datos. El cambio de Agricultura a otro tipo de cobertura (Suelo desnudo, Matorral desértico, etc.), se representó en un 78 % para 2016, como lo muestran los mapas obtenidos, y se reconoció un decremento en Ures y en localidades pequeñas. Este resultado se confirma con cifras oficiales de SAGARPA (2019). A su vez indica que la disminución del volumen de producción agropecuaria y la considerable afectación económica en la región, con un valor de 7.5 % de disminución del PIB en 2016 (al tomar como base 2010).

El porcentaje de variación de la cobertura tomó como base el año 2010. Estos resultados corresponden al área ribereña de la clasificación. La Agricultura en 2016 presentó una disminución superficial del 51.8 % (reducción de 12,981 ha), mientras que en el periodo global 2010-2018 solamente hay un decremento del 4.5 % (reducción de 1,143 ha); en otras palabras, hubo una recuperación del casi 50 % (recuperación de 11,838 ha), respecto al año 2016.

Así, se concluye que, en 2010, la economía y la actividad agropecuaria constituían una contribución importante para la región; más adelante, a causa de los eventos antrópicos y climatológicos ocurridos en 2014, se vio una afectación en el uso del suelo y la economía. Se considera al evento antrópico como el que mayor afecta a la región y esto se refleja en los siguientes efectos:

- Cambio de cobertura (menor producción agropecuaria);
- disminución económica;
- afectación en los productos regionales (menores ventas);
- incremento de migración debido a la baja en la economía regional, en las comunidades de Ures, Molino de Camou, Huépac, Arizpe y Baviácora;
- calidad de agua en la región (R. Díaz-Caravantes et al., 2016; R. E. Díaz-Caravantes et al., 2018).

Los resultados obtenidos muestran una variación de la Agricultura, la Vegetación ribereña y el Mezquital en la región. La disminución de superficie para Agricultura y Vegetación ribereña en 2016 se pudiera deber a la condición de sequía, pero según datos de CONAGUA (2015), fue el año con mayores precipitaciones, por lo que el problema recae en el contexto regional. Asimismo, la disminución de la Agricultura en estos años (2014 al 2018) se debió al bajo consumo y a la escasa demanda del producto local.

Lo anterior llevó a que algunas personas dedicadas al campo buscaran otra fuente de ingreso, de ese modo se desplazó la actividad agrícola (comerciantes y servicios), y se propiciaron graves consecuencias económicas (bajo PIB), sociales (migración) y ambientales (cambio de uso de suelo). Por la información mostrada en este documento, surgen varias interrogantes: ¿Será efecto del evento climatológico?, ¿será por lo ocurrido el 6 de agosto de 2014? o ¿será por una combinación de ambos?; ¿quién es el responsable?

## Referencias bibliográficas

- Aguilar-Arias, H., Mora-Zamora, R., & Vargas-Bolaños, C. (2014). METODOLOGÍA PARA LA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA DE IMÁGENES ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 Y LANDSAT 8 CON EL MÓDULO FLAASH DEL SOFTWARE ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 39–59. <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Anderson, J. R., Hardy, E. E., Roach, J. T., & Witmer, R. E. (1976). *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data* (Núm. 964). <http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp964>
- 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 México. *Conservation Biology*, 18(6), 1504–1514.
- Bravo-Peña, L., & Castellanos-Villegas, A. (2013). *Tendencias del Índice de la diferencia normalizada de la vegetación (NDVI) en el estado de Sonora. Implicaciones potenciales sobre el sector pecuario en el contexto del cambio climático* (pp. 245–283).
- Búrquez, A., & Martínez-Yrizar, A. (1997). Conservation and Landscape Transformation in Sonora, México. *Journal of the Southwest*.
- Bushnell-Ensign, S. (1988). Mineralization at Cananea, Sonora, and the paragenesis and zoning of breccia pipes in quartzofeldspathic rock. *Economic Geology*, 83(8), 1760–1781. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.8.1760>

- Bustamante-Icedo, A. (2016). *Efectos ambientales y uso de suelo en la fenología de tres áreas prioritarias para la conservación en el noroeste de México* [Maestría]. Universidad de Sonora. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas.
- Calmus, T., Valencia-Moreno, M., Del Rio-Salas, R., & Ochoa-Landín, L. (2016). *Estudio Geológico de “Línea Base” en el Marco de la evaluación del impacto ambiental asociado al derrame del represo de lixiviados de la Mina Buenavista del Cobre hacia la Cuenca del Río Sonora.*
- Calvario Parra, J. E. (2007). Masculinidad, riesgos y padecimientos laborales: Jornaleros agrícolas del poblado Miguel Alemán, Sonora. *Región y sociedad*, 19(40), 39–72.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Rialp.
- CIAD. (2013). *Programa Detallado de Acciones de Gestión Integral para la Restauración Hidrológica del Río Sonora.*  
[https://www.ciad.mx/archivos/Programa\\_Detallado\\_Acciones\\_Rio\\_Sonora.pdf](https://www.ciad.mx/archivos/Programa_Detallado_Acciones_Rio_Sonora.pdf)
- CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero (2624) Río Sonora, Estado de Sonora. Comisión Nacional del Agua.*
- CONAGUA. (2016). *Inició el Monzón Norteamericano en el Noroeste de México.*  
<https://www.gob.mx/conagua/prensa/inicio-el-monzon-de-norteamerica-en-el-noroeste-de-mexico>
- CONAPO. (2015). *Índice de marginación a nivel localidad 2015. Consejo Nacional de Población.*

- Congalton, R. G. (2004). Putting the map back in map accuracy assessment. In: Lunetta, R. S. and J. G. Lyon (eds.). *Remote sensing and GIS accuracy assessment*.
- Congalton, R. G., & Kass, G. (1999). Assessing the Accuracy of Remotely Sensed data: Principles and Practices. *Boca Raton, FL, USA.*, 137.
- Cornejo-Denman, L. A. (2017). *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* [Maestría]. Universidad de Sonora. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas.
- Damon, P. E., Shafiqullah, M., & Clark, K. F. (1983). Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1052–1071. <https://doi.org/10.1139/e83-095>
- Díaz-Caravantes, R., Duarte-Tagles, H., & Durazo-Gálvez, F. M. (2016). Amenazas para la salud en el Río Sonora: Análisis exploratorio de la calidad del agua reportada en la base de datos oficial de México. *Revista Universidad Industrial Santander Salud*, 48(1), 91–96. <http://dx.doi.org/10.18273/revsal.v48n1-2016010>
- Díaz-Caravantes, R. E., Duarte-Tagles, H., Pallanez-Murrieta, M., Moreno-Vázquez, J. L., Mejía-Santellanes, J. A., & Durazo-Gálvez, F. M. (2018). Análisis de los criterios para proteger la vida acuática: El río Sonora después del derrame minero de 2014. *Aqua-LAC*, 10(1), 75–87.
- Drozd, A., & Fernández, V. (2016). *Caracterización de firmas espectrales en distintos tramos del río Uruguay y su relación con variables biológicas y físicas del agua*.

- Elizalde-Castillo, F. (2017). *Acción colectiva en los ejidos de Santiago de Ures y San Pedro de Ures, Sonora en torno al uso del agua y el impacto social de la contaminación del Río Sonora en el 2014* [Licenciatura]. Universidad de Sonora. Departamento de Sociología.
- Escoboza-Castillo, P. A. (2018). *Construcción de la percepción de riesgo en el consumo de agua potable de la red en el molino de Camou: En el contexto de la contingencia minera en el río Sonora ocurrida en 2014*. [Licenciatura]. Universidad de Sonora. Departamento de Sociología.
- ESRI. (s/f). *Clasificación de máxima verosimilitud*. Recuperado el 27 de marzo de 2020, de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/maximum-likelihood-classification.htm>
- Feddema, J. J., Oleson, K. W., Bonan, G. B., Mearns, L. O., Buja, L. E., Meehl, G. A., & Washington, W. M. (2005). The Importance of Land-Cover Change in Simulating Future Climates. *Science*, 310, 1674–1678.
- Fimbres, A., & Lizárraga, J. (2009). Consumo de Agua y Nitrógeno en Esparrago (*Asparagus Officinalis* L.) de Baja Población de Plantas con Riego por Cinta. *Revista Agraria Nueva Época*, 6, 10–13.
- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185-201.
- Gandarilla-Aizpuro, F. J. (2015). *Evaluación de la dinámica de cambio de cobertura de suelo en las subcuencas río San Miguel y río Zanjón, Sonora* [Licenciatura]. Universidad de Sonora. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas.

- García-Romero, A., Montoya, Y., Ibarra, M. V., & Garza, G. (2010). Economía y Política en la evolución contemporánea de los usos del suelo y la deforestación en México: El caso del volcán cofre de perote. *Interciencia*, 35(5), 321–328.
- Gobierno del Estado de Sonora. (2017). *Plan de Desarrollo para la Zona Económica Especial del Río Sonora 2018-2032*. <https://hacienda.sonora.gob.mx/media/4843/plan-de-desarrollo-zona-economica-especial-rio-sonora.pdf>
- Gómez-Álvarez, A., Ortega-Romero, P., & Yocupicio-Anaya, M. T. de J. (1990). Distribución de Metales Pesados en el Río Sonora y su Afluente el Río Bacanuchi, Sonora, México. *Revista Ecológica*, 1(2), 10–20.
- González León, C. M., William McIntosh, C., Lozano Santacruz, R., Valencia Moreno, M., Amaya Martínez, R., & Rodríguez Castañeda, J. L. (2000). Cretaceous and Tertiary sedimentary, magmatic, and tectonic evolution of north-central Sonora (Arizpe and Bacanuchi Quadrangles), northwest Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 112(4), 600–610. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112<600:CATSMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<600:CATSMA>2.0.CO;2)
- González-León, C. M., Valencia, V. A., López-Martínez, M., Bellon, H., Valencia-Moreno, M., & Calmus, T. (2010). Arizpe sub-basin: A sedimentary and volcanic record of Basin and Range extension in north-central Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 27(2), 292–312.
- Goodrich, D. C., Chehbouni, A., Goff, B., MacNish, B., Maddock, T., Moran, S., ..., & Cooper, D. I. (2000). *Preface paper to the Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere (SALSA) Program special issue*.



[https://www.researchgate.net/publication/222296669\\_Preface\\_paper\\_to\\_the\\_Semi-Arid\\_Land-Surface-Atmosphere\\_SALSA\\_Program\\_special\\_issue](https://www.researchgate.net/publication/222296669_Preface_paper_to_the_Semi-Arid_Land-Surface-Atmosphere_SALSA_Program_special_issue)

Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M. A., & López-Ríos, G. F. (2006). Ecología de las Zonas ribereñas. *Revista de Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 12(1), 55–69.

Hall, F., Botkin, D., Strebel, D., Woods, K., & Goetz, S. (1991). Large-Scale Patterns of Forest Succession as Determined by Remote Sensing. *Ecology*, 72, 628.  
<https://doi.org/10.2307/2937203>

Hernández, H. (2006). *La vida en los desiertos mexicanos*. Fondo de Cultura Económica.

Ibarra-Barreras, M. F. (2018). *Justicia Ambiental y Movilización Sociolegal en el Río Sonora (2014-2017)* [Maestría]. El Colegio de Sonora.

INEGI. (2015a). *Censo general de población y vivienda 2015*.

INEGI. (2015b). *México en Cifras. Sonora. Indicadores-Mapas-Tabulados-Publicaciones-Servicios*. <http://beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=26#>

INEGI. (2016). *Anuario estadístico y geográfico de Sonora 2016. Instituto Nacional de Geografía. México*. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825083694>

Jensen, J. (2005). *Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective*.

Kepner, W., Watts, C., Edmonds, J., Maingi, K., Marsh, S., & Luna, G. (2000). *A landscape approach for detecting and evaluating change in a semi-arid environment*.

- King, R. (1939). Geological reconnaissance in the northern Sierra Madre Occidental of Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 50, 1625–1722.
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), 362.
- Kruse, F. (2004). *Comparison of Atrem, Acorn, and Flaash atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO*.
- Lambin, E. F. (2003). Linking Socioeconomic and Remote Sensing Data at the Community or at the Household Level: Two Case Studies from Africa. En J. Fox, R. R. Rindfuss, S. J. Walsh, & V. Mishra (Eds.), *People and the Environment: Approaches for Linking Household and Community Surveys to Remote Sensing and GIS* (Versión 1, 1a ed., pp. 223–240). Kluwer Academic Publishers.
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of Land-Use and Land-Cover Change in Tropical Regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 205–241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>
- Laznicka, P. (Ed.). (2006). Finding or Acquiring Giant Deposits. En *Giant Metallic Deposits: Future Sources of Industrial Metals* (pp. 627–648). Springer. [https://doi.org/10.1007/3-540-33092-5\\_19](https://doi.org/10.1007/3-540-33092-5_19)
- Leonberger, G. (2002). Revealing the small range of radio-microwave frequencies. *Phys. Educ*, 37, 425–427.

- 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 prevengan sus efectos negativos. *Estudios Sociales, Especial*, 221–241.
- López-Reyes, M. (2001). Degradación de suelos en Sonora: El problema de la erosión en los suelos de uso ganadero. *Región y sociedad*, 13(22), 73–97.
- Lubchenco, J., Olson, A. M., Brubaker, L. B., Carpenter, S. R., Holland, M. M., Hubbell, S. P., Levin, S. A., MacMahon, J. A., Matson, P. A., Melillo, J. M., Mooney, H. A., Peterson, C. H., Pulliam, H. R., Real, L. A., Regal, P. J., & Risser, P. G. (1991). The Sustainable Biosphere Initiative: An Ecological Research Agenda: A Report from the Ecological Society of America. *Ecology*, 72(2), 371–412. <https://doi.org/10.2307/2937183>
- Luque, D., Murphy, A., Jones, E., Martínez Yrizar, A., Burquez, A., Manrique, T., & Esquer, D. (2019). *Río Sonora: El Derrame de la Mina Buenavista del Cobre-Cananea, 2014*.
- Martínez-Yrizar, A., Felger, R., & Búrquez, A. (2010). Los ecosistemas terrestres: Un diverso capital natura. *Diversidad Biológica de Sonora*. Editores: Molina, F., Van Devender, T. UNAM. CONABIO, 129–147.
- Mas-Jean, F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., Castro, R., Fernández, T., & Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: A nationwide multidecade spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.06.002>

- Mendoza, E., & Dirzo, R. (1999). Deforestation in Lacandonia (southeast Mexico): Evidence for the declaration of the northernmost tropical hot-spot. *Biodiversity and Conservation*, 8, 1621–1641. <https://doi.org/10.1023/A:1008916304504>
- Mott-Lacroix, K. E., Tapia-Villaseñor, E., & Springer, A. (2017). Environmental flows in the desert rivers of the United States and Mexico: Synthesis of available data and gap analysis. *Journal of Arid Environments*, 140, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.01.011>
- Ochoa-Landín, L., & Echavarrí, P. (1978). Observaciones preliminares Sobre la secuencia de las intrusiones hipabisales en el Tajo Colorada-Veta del distrito minero de Cananea. *Boletín. Departamento de Geología. UNISON*, 57–60.
- Ochoa-Landín, L., Pérez-Segura, E., Del Rio-Salas, R., & Valencia-Moreno, M. (2011). Depósitos minerales de Sonora, México. En Calmus, Thierry (ed.), *Panorama de la Geología de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología*, 118, 299–331.
- Paz-Pellat, F. (2018). Correcciones atmosféricas relativas de imágenes de satélite: Patrones invariantes y modelos atmosféricos. *Terra Latinoam*, 36(1). <http://dx.doi.org/10.28940/terra.v36i1.228>
- Pérez-Moreno, C. A. G. (2014). *Sistema inteligente para el reconocimiento y clasificación de imágenes terrestres de un simulador de vuelo no tripulado* [Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pérez-Segura, E. (2014). *Estudio de la información geoquímica de sedimentos de arroyo de las sierras adyacentes a la cuenca del río Sonora-Bacanuchi por los elementos: As, Al, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn. Informe interno para MBVC.*

- PIADER. (2018). *Metodología para la clasificación de coberturas a partir del procesamiento de imágenes satelitales*. <http://www.nosolosig.com/libros-geo/1010-metodologia-para-la-clasificacion-de-coberturas-a-partir-del-procesamiento-de-imagenes-satelitales>
- RAN. (2018). *Padrón e Historial de Núcleos Agrario. Registro Agrario Nacional*.
- Rangel-Medina, M. (2019). La contingencia por derrame de solución de cabeza en el Río Sonora y procesos geoquímicos ambientales en una cuenca hidrológica mineralizada. *Geomimet*. [http://www.revistageomimet.mx/2019/10/la-contingencia-por-derrame-de-solucion-de-cabeza-en-el-rio-sonora-y-procesos-geoquimicos-ambientales-en-una-cuenca-hidrologica-mineralizada/?fbclid=IwAR3bTiKd1bouJL-uE2D-1hBwmpWPtIJbJ8j9aV3RaHnLkFSk4I\\_cXD3psQo](http://www.revistageomimet.mx/2019/10/la-contingencia-por-derrame-de-solucion-de-cabeza-en-el-rio-sonora-y-procesos-geoquimicos-ambientales-en-una-cuenca-hidrologica-mineralizada/?fbclid=IwAR3bTiKd1bouJL-uE2D-1hBwmpWPtIJbJ8j9aV3RaHnLkFSk4I_cXD3psQo)
- Richards, J. A. (2013). *Análisis de imagen digital de teledetección* (5a ed.). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30062-2>
- Roldan Quintana, J., Lozano Santacruz, R., & Reyna, S. (1989). Pegmatitas de la sierra El Jaralito al suroeste de Baviácora, Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 8(1), 15–21.
- Roldán-Quintana, J., & Grijalva-Noriega, F. J. (1998). An overview of the Cenozoic tectonic and magmatic evolution of Sonora, northwestern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 15(2), 4.
- Romero Lázaro, E. M., Ramos Pérez, D., Romero, F. M., & Sedov, S. (2019). Indicadores Indirectos de Contaminación Residual en Suelos y Sedimentos de la Cuenca del Río Sonora, México. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. *Revista*

*Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2), 371–386.  
<https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.02.09>

Romo-León, J. R., Castellanos-Villegas, A., & Méndez-Estrella, R. (2014). *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía—Consejo de Cuenca Alto Noroeste* [Reporte Técnico]. Comisión Nacional del Agua. [www.pronacose.gob.mx/pronacose14/contenido/documentos/IMTA\\_CONAGUA%20cuenca%20Noroeste%20salida.pdf](http://www.pronacose.gob.mx/pronacose14/contenido/documentos/IMTA_CONAGUA%20cuenca%20Noroeste%20salida.pdf)

SAGARPA. (2015). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*.

Secretaría Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON). Delegación Sonora*.

SGM. (2018). *Panorama Minero del Estado de Sonora*. Servicio Geológico Mexicano. <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/SONORA.pdf>

Singer-Donald, A., Berger-Vladimir, B., & Moring-Barry, C. (2008). *Porphyry copper deposits of the world: Data-base, map, and grade and tonnage models. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2005-1060*. <https://pubs.usgs.gov/of/2008/1155/>

Stehman-Stehman, V., & Raymond-Czaplewski, L. (1998). Design and Analysis for Thematic Map Accuracy Assessment: an application of satellite imagery. *Remote Sensing of Environment. Remote Sensing of Environment*, 64. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00010-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00010-8)

Tso, B., & Mather, P. (2009). *Classification Methods for Remotely Sensed Data, Second Edition*. Taylor and Francis, CRC Press. Boca Raton, Florida. CRC Press.

<https://www.crcpress.com/Classification-Methods-for-Remotely-Sensed-Data/Mather-Tso/p/book/9781420090727>

Tucker, C. J., Townshend, R. G., & Goff, T. E. (1985). African land-cover classification using satellite data. *Science*, 227, 369–375.

UNIRADIO. (2016, diciembre 30). *Incrementa migración de jóvenes tras derrame tóxico minero en río Sonora*. <https://www.uniradionoticias.com/noticias/sonora/456899/incrementa-migracion-de-jovenes-tras-derrame-toxico-en-rio-sonora.html>

USGS. (2019). *Valoración económica de las imágenes del paisaje*.

Valdez-Zamudio, D., Castellanos-Villegas, A., & Marsh, S. (2000). Land cover changes in central Sonora Mexico. *Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.*, 13, 349–351.

Vega Guzmán, Á., López García, J., & Manzo Delgado, L. de L. (2008). Análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos, México. *Investigaciones Geográficas*, 67, 59–75.

Vega-Granillo, E., Cirret-Galán, S., Parra-Velasco, M. L., & Zavala-Juárez, R. (2011). Hidrogeología de Sonora. *Boletín. Instituto de Geología. UNAM*, 118.

Viera, A. J., & Garrett, J. M. (2005). Understanding interobserver agreement: The kappa statistic. *Family Medicine*, 37(5), 360–363.

- Villarreal, M. L., Leeuwen-Willem, J. D. V., & Romo-León, 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. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.644594>
- Wanielista, M., Kersten, R., & Eaglin, R. (1997). *Hydrology: Water quantity and quality control*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. <https://www.wiley.com/en-us/Hydrology%3A+Water+Quantity+and+Quality+Control%2C+2nd+Edition-p-9780471072591>
- Wilson, J. S., Clay, M., Martin, E., Stuckey, D., & Risch, V.-R. (2003). Evaluating environmental influences of zoning in urban ecosystems with remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 303–321.
- Zaimes, J. L., 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 una área natural protegida del sur de Sonora. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 15, 187–197.



## Anexo

### Anexo 1

**Tabla 19.** Familias con más de 40 especies y más de 20 géneros; Fuente: Cornejo-Denman, 2017

Familia	Especie	Géneros	Nombre Común	Especie
Acantáceas	43			
Agavóideas	42	Agave	Agave, maguey	30
Amaranteaceas	69			
Apocinaceas	78	Asclepias	Algodoncillo, venenillo, bandera española, flor de sangre, platanillo, hierba María, mata ganado o burladora	28
Asteráceas	513	Erigeron	Hierba de burro, Vitadina, Vitadonia o Margarita cimarrona	23
		Brickellia	Jara blanca, vara blanca	22
Boraginaceas	81			
Brasicaceas	56			
Cactáceas	107	Echinocereus	Desconocido	
Convolvulaceas	82	Ipomoea	Gloria de la mañana, manto de María, don Diego de día, campanilla morada, quiebra platos	20
Cuburbitaceas	42			42
Ciperáceas	91	Cyperus	La juncia real, coyolillo, cípero, castañuela, cebollín, chufa púrpura, corocillo o coquito	
Euphorbiaceas	149	Euphorbia	Albahaca venenosa, lechetresma, hierba del coyote, siempre verde	49
Fabáceas	344	Dalea	Mezquitillo, mezquitillo del campo, toronjil.	77
		Desmodium	Amor seco, pegarropa, pata de perro	36

Continua...

**Tabla 20.** Familias con más de 40 especies y más de 20 géneros; Fuente: Cornejo-Denman, 2017

Familia	Especie	Géneros	Nombre Común	Especie
		Physalis	Uchuva, aguaymanto, uvilla o bien ushun	30
		Astragalus	Chinchín, garbancillo, hierba plata y sanadora	22
Fagáceas		Quercus	Robles, Encinos	20
Lamiáceas	71	Salvia	Tacote y tapachichi, azul-sipari, charahuesca, chía	30
Malváceas	130			28
Orquidáceas	47			
Plantagináceas	45			
Poáceas	360	Muhlenbergia	Hierba bambú	48
		Panicum	Alcali zacate, paja guinea, pajarito, mijo verde, castilla, chilena, india, melusa, zaina	22
		Eragrostis	Zacate llorón, cola de ardilla, pelo de conejo, zacate amor, bayal, bayal-suuk, zacate de agua	20
		Aristida	Zacate de agua, escobilla, pasto araña, tres barbas, zacate tres barbas, cola de zorro	21
Pteridáceas	69	Cheilanthes	Chujcho	26
Rubiáceas	53			
Solanáceas	80	Solanum	Tompillo, buena mujer, pera, tomatito de buena mujer	20
Vebernáceas	41			

## Anexo 2

**Tabla 21.** Flora Sonorense con algún grado de protección, NOM-059-2010; Fuente: SEMARNAT, 2010

Nombre Común	Familia	Categoría	Ecosistema
Palma de la virgen	Zamiaceae	Peligro de extinción	Bosque seco
Falso laurel	Lauraceae	Peligro de extinción	Bosque seco
Licopodio	Selaginellaceae	Peligro de extinción	Bosque seco
Tila	Tiliaceae	Peligro de extinción	Bosque seco
-	Cactaceae	Peligro de extinción	Desértico
Palma	Arcaceae	Amenazada	Bosque seco
Amapa (amarilla, morada)	Biognoniaceae	Amenazada	Bosque seco
Nogal	Juglandaceae	Amenazada	Bosque seco
Helecho	Psilotaceae	Amenazada	Bosque templado
Agave	Agavaceae	Amenazada	Desértico
Pinabete	Pinaceae	Protección especial	Bosque templado
Ciprés	Cupressaceae	Protección especial	Bosque templado
Pino blanco	Pinaceae	Protección especial	Bosque templado
Saya	Bicaceae	Protección especial	Desértico
Biznaga	Cactaceae	Protección especial	Desértico
Guayacán	Zygophyllaceae	Protección especial	Desértico
Cabeza de viejo	Cactaceae	Protección especial	Desértico
Palo fierro	Zamiaceae	Peligro de extinción	Bosque seco
Palo fierro	Fabaceae	Protección especial	Desértico
Reina de la noche	Cactaceae	Protección especial	Desértico
Sarramatraca	Cactaceae	Protección especial	Desértico
Lirio	Meliathaceae	Protección especial	Dulceacuícola
Mangle negro	Acanthaceae	Protección especial	Humedal costero
Mangle botoncillo	Combretaceae	Protección especial	Humedal costero
Mangle blanco	Combretaceae	Protección especial	Humedal costero
Mangle rojo	Rhizophoraceae	Protección especial	Humedal costero
Zacate	Poaceae	Protección especial	Pastizal

Anexo 3 Tabla. Matriz de Transición

Tabla 22. Matriz de cambio 2010-2014

Matriz de cambio de uso de suelo			Año 2014								Total
			AG	MZ	MD	CA	ZU	SD	RÑ	SB	
			1	2	3	4	5	6	7	8	
Año 2010	AG	10	13,011	370	3,129	117	2,797	2,400	2,655	546	25,025
	MZ	20	1,752	507	3,243	1	18	7	253	146	5,927
	MD	30	1,352	119	15,201	20	347	194	715	302	18,250
	CA	40	81	34	240	909	75	6	32	1	1,378
	ZU	50	146	4	67	7	7,243	190	82	0	7,739
	SD	60	1,425	7	1,358	0	1,668	1,018	244	168	5,888
	RÑ	70	2,087	646	4,676	34	266	73	1,850	62	9,694
	SB	80	1,700	46	535	0	1	24	3	552	2,861
Total			21,554	1,733	28,449	1,088	12,415	3,912	5,834	1,777	

Tabla 23. Matriz de cambio 2014-2016.

Matriz de cambio de uso de suelo			Año 2016								Total
			AG	MZ	MD	CA	ZU	SD	RÑ	SB	
			1	2	3	4	5	6	7	8	
Año 2014	AG	10	8,600	269	5,396	20	2,797	477	2,736	1,256	21,551
	MZ	20	355	494	175	1	44	1	634	27	1,731
	MD	30	653	523	21,684	17	1,537	240	3,156	638	28,448
	CA	40	9	1	0	931	84	0	63	0	1,088
	ZU	50	297	3	255	30	11,282	200	349	0	12,416
	SD	60	694	5	942	0	1,036	890	342	6	3,915
	RÑ	70	1,283	208	885	25	690	83	2,661	2	5,837
	SB	80	153	9	914	0	7	2	89	601	1,775
Total			12,044	1,512	30,251	1,024	17,477	1,893	10,030	2,530	

**Tabla 24.** Matriz de cambio 2014-2018.

Matriz de cambio de uso de suelo			Año 2018								Total
			AG	MZ	MD	CA	ZU	SD	RÑ	SB	
			1	2	3	4	5	6	7	8	
Año 2014	AG	10	12,066	1,595	1,552	420	782	1,145	3,344	647	21,551
	MZ	20	424	651	111	34	35	11	431	34	1,731
	MD	30	6,177	2,388	14,164	1,060	351	1,030	2,887	391	28,448
	CA	40	90	1	13	903	44	2	35	0	1,088
	ZU	50	2,294	23	507	278	7,943	806	564	1	12,416
	SD	60	1,092	22	540	23	301	1,213	722	2	3,915
	RÑ	70	934	715	577	177	327	247	2,858	2	5,837
	SB	80	805	102	478	1	0	128	32	229	1,775
<b>Total</b>			23,882	5,497	17,942	2,896	9,783	4,582	10,873	1,306	

**Tabla 25.** Matriz de cambio 2010-2018.

Matriz de cambio de uso de suelo			Año 2018								Total
			AG	MZ	MD	CA	ZU	SD	RÑ	SB	
			1	2	3	4	5	6	7	8	
Año 2010	AG	10	11,858	933	2,746	435	1,532	2,127	5,109	285	25,025
	MZ	20	3,198	1,276	408	116	13	59	655	202	5,927
	MD	30	2,591	676	11,674	442	441	546	1,648	232	18,250
	CA	40	138	26	127	851	51	24	159	1	1,377
	ZU	50	485	5	120	65	6,515	368	180	1	7,739
	SD	60	1,592	81	1,501	92	903	1,199	501	19	5,888
	RÑ	70	2,275	2,254	1,201	894	328	149	2,569	24	9,694
	SB	80	1,745	246	165	1	0	110	52	542	2,861
<b>Total</b>			23,882	5,497	17,942	2,896	9,783	4,582	10,873	1,306	

**Anexo Fotográfico.**

**Fotografía 1.** Ures, área de cultivo.



**Fotografía 2.** Vegetación ribereña, cauce Río Sonora.



**Fotografía 3.** Álamos secos se contaron 189 de los cuales 185 se encontraban es estas condiciones. Ures.



**Fotografía 4.** Levantamiento de datos.



**Fotografía 5.** Matorral desértico y especie de bovino muerta.

