

ANÁLISIS ESPACIAL DEL CAMBIO DE COBERTURA/USO DEL SUELO ASOCIADO A PASTOS EXÓTICOS EN LA SIERRA LIBRE, SONORA

SPATIAL ANALYSIS OF THE LAND COVER/LAND USE CHANGE ASSOCIATED TO EXOTIC GRASSLAND IN SIERRA LIBRE, SONORA

Ana Karen Bustamante-Icedo¹, José Raúl Romo-León*¹, Alejandro Emilio Castellanos-Villegas¹, Romeo Méndez-Estrella¹, Fabiola Judith Gandarilla-Aizpuro^{1,2}

¹ Laboratorio de Ecosistemas y Percepción Remota, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora. Luis Donaldo Colosio s/n, entre Sahuaripa y Reforma, Colonia Centro, Hermosillo 83000, México. Correo-e: joser2@guayacan.uson.mx.

² Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, 3er Circuito Exterior s/n Junto al Jardín Botánico Col. Ciudad Universitaria Delegación Coyoacán, Ciudad de México 04510, México.

RESUMEN

Diversas actividades humanas como la ganadería han transformado gran parte de la superficie terrestre, provocando cambios en todos los ecosistemas, incluyendo las áreas prioritarias para la conservación, como el caso de Sierra Libre, donde la principal actividad económica es la ganadería extensiva, cuyas acciones de manejo ocasionan la sustitución de vegetación natural por la introducción de pastos exóticos como el zacate buffel. El objetivo para este trabajo fue: generar clasificaciones de cobertura/uso de suelo mediante percepción remota y cuantificar el cambio en la cobertura entre 1993 y 2011, con el fin de evaluar las modificaciones del paisaje asociadas a la introducción y permanencia de praderas de buffel en Sierra Libre. Se observó intercambio entre pastizales Inducidos y Mezquital, resultando en una ganancia neta de 4,049 ha de pastizales; sin embargo, el intercambio entre Matorral Subtropical y Pastizales resultó en una pérdida neta de 3,313 ha de los mismos, entre 1993 y 2011. Contrario a lo esperado, los pastizales inducidos, no aumentaron considerable en extensión entre 1993 y 2011. Esto sugiere la necesidad de contabilizar las áreas cubiertas por zacate buffel y replantar las teorías relacionadas a la utilidad de especies exóticas para forraje en la zona central de Sonora.

Palabras clave: percepción remota, ganadería, zacate buffel, áreas prioritarias, conservación

ABSTRACT

Diverse human activities such as livestock farming have transformed much of the land surface, causing changes in all ecosystems, including priority areas for conservation, such as Sierra Libre, where the main economic activity is extensive livestock farming. The management led to the replacement of natural vegetation, by the introduction of exotic grasses such as buffel grass. The objective of this work was to generate a classification of land cover/land use using remote sensing techniques to quantify the change in coverage between 1993 and 2011, in order to evaluate the landscape modifications associated with the introduction and perma-

nence of buffel grasslands in Sierra Libre. It was observed an interchange between Induced Grasslands and Mezquital, resulting in a net gain of 4,049 ha of grassland, however, the exchange between Subtropical Shrubland and Grassland resulted in a net loss of 3,313 ha of these between 1993 and 2011. Contrary to what expected, induced grassland did not increase significantly between 1993 and 2011. This suggests the need to account for the areas covered by buffel grass and to rethink the theories related to the usefulness of exotic forage species in central Sonora.

Key Words: remote sensing, livestock, buffel grass, priority areas, conservation

INTRODUCCIÓN

El principal factor de cambios en el paisaje son las actividades humanas que impactan la cobertura vegetal (Vergés et al., 2009). Estos cambios a menudo modifican el ambiente físico y biológico, provocando cambios en el funcionamiento y la biodiversidad de los ecosistemas (Vitousek et al., 1997), al propiciar la reestructuración de las comunidades vegetales (Arriaga et al., 2004). Los diversos ecosistemas de México son continuamente modificados y fragmentados debido a distintos factores antropogénicos tales como la expansión de la frontera agrícola, la ganadería, el desarrollo urbano y en general la extracción de especies con valor económico, lo cual ha causado grandes modificaciones a la cobertura vegetal (Montaño-Arias, 2006; Bravo-Peña et al., 2010; Castellanos et al., 2010).

En México, las zonas áridas y semiáridas comprenden más de la mitad del país (aproximadamente 54%) (Arámbula, 2005). En estas zonas, y principalmente en la región noroeste del país, las actividades productivas asociadas a la ganadería intensiva y extensiva ocupan gran parte del territorio (Camou, 1990; Perramond, 2001; López y De La Fuente, 2003). En la búsqueda por aumentar la capacidad de carga de los agostaderos, la introducción de especies exóticas con valor forrajero en grandes extensiones de terreno, se ha convertido una práctica común (Bravo-Peña et al., 2010; Castellanos et al., 2010).

*Autores para correspondencia: José Raúl Romo León
Correo electrónico: joser2@guayacan.uson.mx

Recibido: 27 de noviembre de 2017

Aceptado: 15 de octubre de 2018

Particularmente en el Desierto Sonorense, uno de los factores de cambio de uso de suelo que tiene mayor impacto, es la conversión de la vegetación natural hacia pastizales inducidos con fines ganaderos (Castellanos *et al.*, 2010). El cambio provocado por esta actividad consiste en el reemplazo de la vegetación nativa (total o parcial), por distintas especies de pastos, pero principalmente por el zacate buffel (*Cenchrus ciliaris* L.). Este reemplazo se lleva a cabo mediante desmonte, lo cual repercute de manera instantánea en la estructura de la vegetación (Brenner *et al.*, 2012).

El zacate buffel es originario del sur de África, y fue introducido en los años 30's por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en gran parte de Texas y Arizona, esto con el fin de incrementar la productividad de forrajes para el ganado vacuno (Castellanos *et al.*, 2002; Lyons *et al.*, 2013). En 1954 esta especie llegó al noroeste de México, con el propósito de mejorar las condiciones de alimentación para la ganadería regional (Camou, 1990; Yetman y Búrquez, 1998).

Diversas instituciones gubernamentales de México, han promovido programas con subsidios (ALCAMPO, PROGAN) para la implementación de las praderas de zacate buffel (Castellanos *et al.*, 2002; Bravo-Peña *et al.*, 2010), y se estima que hasta el año 2000 en Sonora se habían plantado cerca de 1.6 millones de hectáreas con la semilla de este pasto (Búrquez y Martínez-Yrizar, 2006). Lo anterior ha repercutido en los ecosistemas naturales a diferentes escalas o niveles, afectando la funcionalidad y otros aspectos como la productividad primaria y riqueza de especies (Castellanos *et al.*, 2002; Franklin y Molina-Freaner, 2010; Lyons *et al.*, 2013).

A pesar de la importancia que tiene la presencia del zacate Buffel en Sonora, pocos han sido los esfuerzos por conocer la superficie cubierta por pastizales inducidos en el Desierto Sonorense o en la entidad. No obstante, la percepción general de los trabajos que se han realizado al respecto, sugiere que las extensiones de este pasto han ido en aumento (Valdez-Zamudio *et al.*, 2000; Franklin *et al.*, 2006; Nagler *et al.*, 2009; Brenner *et al.*, 2012).

En la región central de Sonora convergen diversas zonas biogeográficas, dando lugar a sitios con alta diversidad biológica (Martínez-Yrizar *et al.*, 2010). Uno de estos sitios es Sierra Libre, la cual forma parte de 152 áreas en todo México denominadas por CONABIO como regiones terrestres prioritarias para la conservación (Arriaga *et al.*, 2000). El objetivo principal de estas áreas, propuestas por CONABIO, es lograr una regionalización de áreas con características físicas y biológicas especiales, que cuentan con una cantidad de especies endémicas comparativamente mayor que la de otras regiones del país. La Sierra Libre 1) es considerada como una zona de transición y una isla de biodiversidad, 2) funciona como corredor biológico (Arriaga *et al.*, 2000), 3) es posible encontrar una gran cantidad de ecotonos, donde se desarrollan diferentes tipos de comunidades de flora y fauna y, 4) se pueden encontrar restos arqueológicos de distintas culturas como la Seri, Opata y Yaqui (Búrquez y Martínez-Yrizar, 1997). El principal tipo de uso de suelo (uso que se le da al terreno

independientemente de su cobertura vegetal) en la Sierra Libre es la ganadería extensiva (Arriaga *et al.*, 2000), con el fin de mejorar la calidad y cantidad de forraje, muchos de los propietarios de terreno en esta zona han introducido el zacate buffel.

El objetivo del presente estudio fue utilizar técnicas fotogramétricas con datos obtenidos mediante percepción remota, con el fin de generar mapas temáticos de cobertura/uso de suelo, para analizar las dinámicas del paisaje y los cambios históricos en la cubierta vegetal (entre 1993 y 2011) en la Sierra Libre; lo anterior con el fin de 1) observar y cuantificar los cambios en la cobertura de suelo asociados a la implementación de praderas de zacate buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) durante el tiempo de análisis y, 2) discutir cómo estos cambios pueden ser influenciados por los tipos de vegetación nativos en la región (adyacentes a las praderas de buffel) y por las presiones humanas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

La Sierra Libre se encuentra en el estado de Sonora, y forma parte de los municipios de Hermosillo, Guaymas y La Colorada. Se ubica entre las latitudes 28° 15' 00" y 28° 58' 48" N y las longitudes 110° 33' 36" a 111° 04' 48" W y cuenta con una superficie aproximada de 1,961 km² (Figura 1). El clima en la región va de semi-cálido a muy árido, la temperatura promedio esta entre los 18° y los 22°C y la precipitación media anual en la zona es de 328 mm. Su altura sobre el nivel medio del mar oscila entre los 250 hasta los 1,180 metros. Los tipos de vegetación predominantes son el matorral subtropical y el mezquital. La principal actividad económica es esta área es la ganadería extensiva, lo cual ha propiciado la implementación de praderas de zacate buffel con fines de forrajeo (Arriaga *et al.*, 2000).

Bases de Datos para Clasificación de Uso de Suelo

Con el fin de elaborar mapas temáticos de cobertura de suelo, se utilizaron escenas satelitales captadas por el sensor Thematic Mapper (TM), montado en las plataformas Landsat 4 y Landsat 5. Estas imágenes fueron obtenidas ya con preprocesamiento para remoción de ruido atmosférico y ortorectificadas (Chander *et al.* 2007; Villareal *et al.*, 2012). Para la elección de estas imágenes se consideró la variabilidad climática del área de estudio, donde se sabe que la mayor parte de la precipitación ocurre en el verano, por ello, se tomaron en cuenta dos escenas por año, una antes de la época de lluvia (pre-monzón) y otra después o durante la época de lluvia (post-monzón). Esto con el fin de incluir la respuesta fenológica de la vegetación y mejorar la precisión de la clasificación de cobertura de suelo (Villareal *et al.*, 2012; Romo-León *et al.*, 2014). Específicamente se seleccionaron imágenes pre y post monzón para los años de 1993, 2002 y 2011.

Se realizó una derivación de variables con información espacial a partir de las imágenes de Landsat y del modelo de elevación digital (elevación, pendiente y aspecto) del Servi-

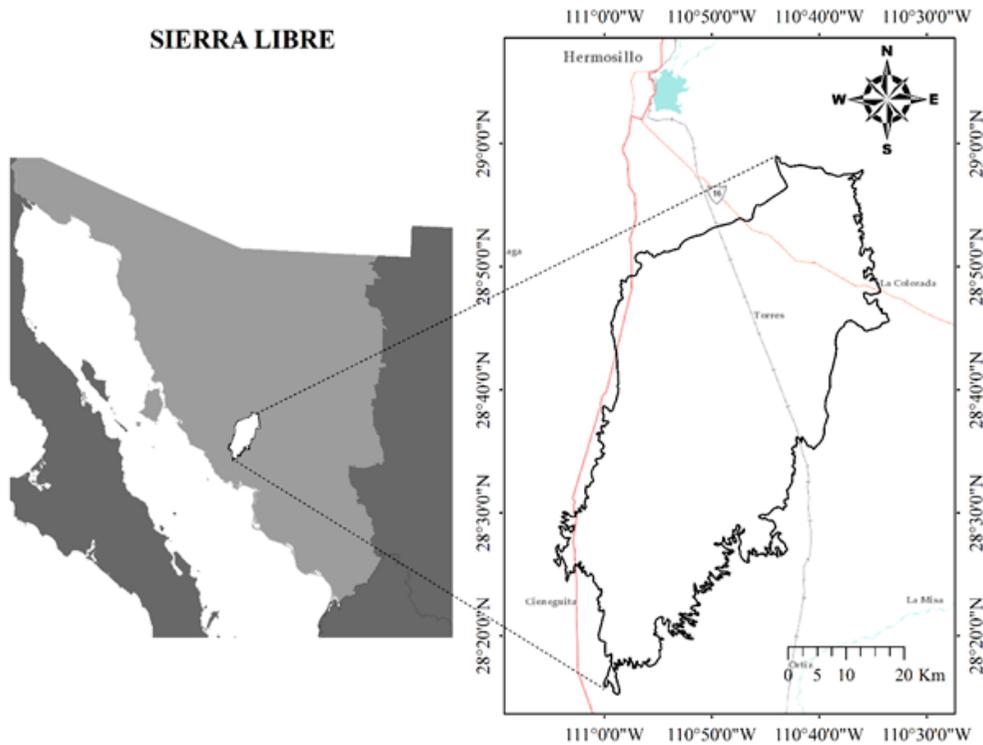


Figura 1. El área de estudio se localiza en la región central de Sonora, México.
Figure 1. The study area is located in the central region of Sonora, Mexico.

cio Geológico de los Estados Unidos (USGS) con resolución de 30 m, para cada año a clasificar. Otras variables que se derivaron fueron distintos índices de vegetación, análisis de componentes principales, y otras transformaciones espectrales (Tabla 1).

Esquema de Clasificación

Uno de los pasos primordiales para lograr una clasificación de cobertura de suelo, es la generación de un esquema de clasificación, es decir, una revisión de los distintos tipos de vegetación que se pueden encontrar en el área de estudio, basándose en distintos aspectos como su forma de vida y dominancia de especies. Este esquema se generó basándose en aproximaciones de los niveles de clasificación propuestos por Anderson (19766) y la descripción de los tipos de vegetación propuestos por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI,2011) en combinación con los tipos de vegetación propuestos por Rzedowski (1978) (Tabla 2). La recopilación de esta información tiene la finalidad de establecer las distintas características que posee cada clase o tipo de vegetación presente en las áreas de estudio (Romoleón et al., 2014).

Modelo de Clasificación

La clasificación se realizó utilizando el método de Árbol de Regresión y Clasificación (CART, por sus siglas en inglés) (Breiman et al., 1984). Este modelo no es lineal, y no hace suposiciones sobre la distribución de los datos, fomenta

Tabla 1. Variables derivadas a partir de los modelos de elevación digital (MED) y las escenas de Landsat TM 4 y 5 seleccionadas.
Table 1. Variables derived from the digital elevation models (DEM) and selected Landsat TM scenes 4 and 5.

Tipo de	Capas de información	Referencia
Elevación, Aspecto y Pendiente (MED)	3	USGS (NED)
EVI (Enhanced Vegetation Index)	2	Van Leeuwen et al., 1999; Huete et al., 2002
NDVI (Normalized difference vegetation index)	2	Tucker, 1979
SAVI (Soil adjusted vegetation index)	2	Huete, 1988
Componentes Principales	12	Collis y Woodcock, 1996
Reflectancia	12	Landsat TM
Tasseled Cap	12	Crist y Cicone, 1984
Varianzas	12	Asner et al., 2002

Tabla 2. Esquema de clasificación para Sierra Libre, basado en niveles de clasificación de Anderson (1976), y las descripciones de la vegetación propuestos por Rzedowski (1978) e INEGI (2011).

Table 2. Classification scheme for Sierra Libre, based on Anderson classification (1976), and vegetation descriptions proposed by Rzedowski (1978) and INEGI (2011).

ID	CLASE	CLAVE	DESCRIPCIÓN
1	Vegetación de Arroyos	VA	Se identifican elementos arbustivos acompañados en ocasiones por elementos subarbóreos. Sus comunidades se desarrollan cercanas a los arroyos, incluso sin la presencia de agua durante todo el año. Está integrada por diversas especies como <i>Prosopis</i> spp, <i>Jatropha</i> spp. Etc.
2	Matorral Subtropical	MS	Formada por arbustos o árboles bajos, inermes o espinosos que se desarrolla en una amplia zona de transición ecológica entre la Selva Baja Caducifolia y matorrales de zonas áridas y semiáridas. Se pueden encontrar especies como <i>Bursera laxiflora</i> , <i>Cassia biflora</i> , <i>Jatropha cordata</i> , <i>Guaicum coulteri</i> , <i>Stenocereus thurberi</i> , <i>Mimosa laxiflora</i> etc.
3	Suelo desnudo	SD	Extensión de terreno en la cual no se encuentra vegetación aparente. Se ubica principalmente en las zonas mineras y algunos caminos rurales.
4	Pastizal Inducido	PI	Se desarrolla de preferencia en suelos medianamente profundos de mesetas, laderas poco inclinadas. Caracterizado principalmente por la especie <i>Cenchrus ciliaris</i> L.
5	Mezquital	MZ	Vegetación arbórea formada principalmente por mezquites (<i>Prosopis</i> spp.), en zonas semiáridas, sobre suelos planos y profundos. Existe la presencia de algunas especies como <i>Olneya tesota</i> , <i>Encelia farinosa</i> , <i>Mimosa laxiflora</i> , <i>Iberverillea sonorae</i> etc.

el uso de las capas espectrales y auxiliares sin importar la escala de datos (Villareal et al., 2012). Este modelo trabaja bajo un conjunto de condiciones que son organizadas de manera jerárquica, y se aplican sucesivamente desde una "raíz" hasta llegar a un nodo terminal u "hoja" del árbol, con el fin de clasificar cada pixel de la escena entre las clases preestablecidas (Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2012). Esta metodología ha demostrado mayor precisión que otras técnicas de clasificación de uso de suelo para zonas áridas (Villarreal et al., 2012, Romo-León et al., 2013 Romo-León et al., 2014).

Entrenamiento para Clasificación

Dado que esta es una clasificación supervisada, se identificaron puntos de entrenamiento que sirvieron como insumo para el clasificador. Haciendo uso del esquema de clasificación previamente generado, se identificaron los distintos tipos de cobertura presentes en el área de estudio, para posteriormente elegir puntos de entrenamiento por cada tipo de cobertura, mediante visitas de campo. Las visitas de campo y la recolecta de los puntos de entrenamiento se llevaron a cabo durante el verano del 2014 y 2015. Para complementar la información obtenida en campo se establecieron entre 75 - 80 puntos de entrenamiento para cada clase.

Análisis de Precisión

Una clasificación temática de uso de suelo puede considerarse precisa si proporciona una representación imparcial de la cobertura de suelo de la región estudiada (Congalton, 1991; Justice et al., 2000; Foody, 2002; Mas, 1999). Para el presente estudio se realizaron análisis de precisión para las tres clasificaciones temáticas generadas. Con base en lo anterior, se realizó una extracción de 30 puntos al azar por clase, en los mapas temáticos generados, verificando si los puntos al azar caen correctamente o no (en el terreno) en la clase que se les fue asignada mediante la clasificación. En el caso de los

mapas históricos (1993 y 2002) se utilizaron imágenes de alta resolución (obtenidas de Google Earth e INEGI), y el reconocimiento de patrones en compuestos de color verdadero y de falso color, de las imágenes del TM para discernir entre los tipos de cobertura en el análisis de precisión.

Posteriormente se generó una matriz de error, la cual consiste en un arreglo de líneas y columnas que representan un determinado número de muestreos realizados en la imagen temática y que son contrastados con lo que se ve realmente en el sitio estudiado (Congalton, 1991; Romo-León et al., 2013). Con base en estos datos, se realizó el cálculo del coeficiente Kappa, así como la precisión de producción y de usuario, los cuales se utilizan para mostrar la precisión por clase y la precisión general de la clasificación de usos de suelo (Congalton, 1991). Algunos autores (Congalton, 1991; Foody, 2002) consideran una clasificación como precisa si el coeficiente de Kappa es igual o mayor al 75%.

Evaluación de Cambios

Para poder evaluar los cambios que se presentan en la cobertura del suelo se realizó un análisis post-clasificadorio, es decir, una comparación entre las clasificaciones generadas (Coppin et al., 2004; Villareal et al., 2012; Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2014). Este análisis consiste en identificar las diferencias en la cobertura del suelo mediante la observación en diferentes momentos, es decir la comparación de una clasificación generada para cierto año, con respecto a otra clasificación de una fecha posterior. Se generaron mapas de detección de cambios entre 1993-2002, 2002-2011 y 1993-2011, con el fin de detectar la cantidad de hectáreas que cambiaron de una clase a otra en 19 años (1993-2011) analizados. Al ser el principal enfoque del presente trabajo, se hace énfasis en el cambio ocurrido entre pastizales inducidos y los otros tipos de vegetación en el área de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mapas de Cobertura de Suelo

Una vez obtenidas las imágenes del sensor TM y los modelos de elevación digital, se procesaron las variables necesarias para llevar a cabo la clasificación temática. Se generaron 3 mapas de clasificación de cobertura/uso de suelo (1993, 2002 y 2011) (Figura 2). Para todas las clasificaciones, se obtuvieron valores de Kappa mayores al 82%, con una precisión de producción (PP) entre el 71 % y 100% y una precisión de usuario (PU) que varía entre el 73% y 93%. (Tabla 3).

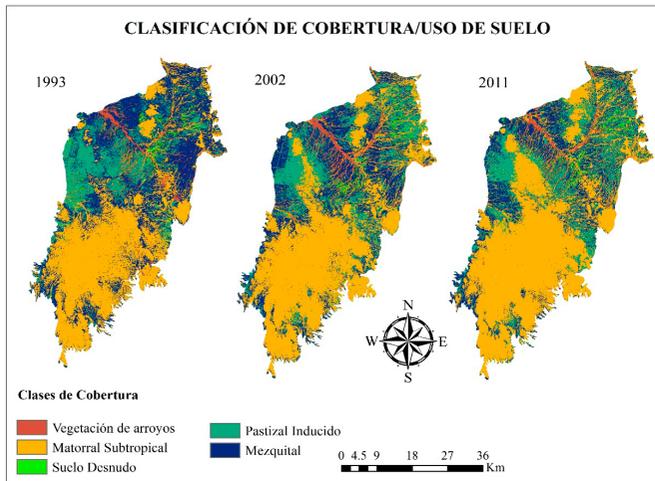


Figura 2. Resultados de la clasificación de cobertura/uso de suelo para 1993, 2002 y 2011 en Sierra Libre.

Figure 2. Results of the classification of land cover/land use for 1993, 2002 and 2011 in Sierra Libre.

Tabla 3. Resumen del análisis de precisión (PU=precisión del usuario, PP=precisión del productor, precisión global y coeficiente Kappa) para las clasificaciones de 1993, 2002, 2011.

Table 3. Precision analysis summary (PU= user precision, PP= producer precision, overall precision and Kappa coefficient) for the 1993, 2002, 2011 classifications.

Clase	1993		2002		2011	
	PU %	PP %	PU %	PP %	PU %	PP %
Vegetación de arroyos	90	100	83	93	93	93
Matorral Subtropical	86	76	93	80	96	73
Suelo desnudo	90	90	80	73	80	57
Pastizal	83	100	87	96	73	85
Mezquital	80	71	93	93	86	74
Precisión Global (%)	85		88		87	
Coficiente Kappa	0.81		0.85		0.83	

Dentro de las clasificaciones de cobertura y uso de suelo realizadas mediante percepción remota existe cierto grado de error o confusión (Foody, 2002). En este contexto, los tipos de cobertura que generaban mayor confusión al momento de la clasificación fueron la Vegetación de arroyos y el Matorral Subtropical, así como el Mezquital que a menudo fue clasificada como Matorral Subtropical, esto se debe

probablemente a la composición de especies de cada clase, también es posible que influya al efecto borde y la confusión de la firma espectral entre las clases (Villareal *et al.*, 2012; Caprioli y Tarantino, 2001). En general, las diferentes clases de cobertura fueron correctamente representadas en los tres mapas generados.

Con el fin de analizar las tendencias de los tipos de cobertura analizados, se hizo especial énfasis en los diversos aumentos y disminuciones que se presentaron durante el periodo estudiado (Figura 3). En el caso de la clase de Vegetación de Arroyos se encontró una disminución de 2,426 ha entre 1993 y 2011, esta clase ocupa entre el 3 y 4 % de la región de Sierra Libre en los 3 años clasificados (Figura 4). Se registró un aumento importante de la clase de Matorral Subtropical, con cerca de 25,500 ha, abarcando un 58% del total del área de estudio. La clase de Suelo Desnudo mantuvo valores de cobertura muy similares dentro del periodo de estudio, cubriendo cerca de 3,500 ha. Algo parecido ocurrió para la clase de Pastizal Inducido, donde su cobertura se mantiene alrededor de las 30,000 ha dentro del periodo de estudio, lo que representa alrededor de 16% del área en el 2011, también se observaron ligeros aumentos en su cobertura a través de los años analizados (2,497 ha entre 1993 y 2002). Por otra parte, y contrario a lo que se podía esperar, se registró una disminución de 918 ha, lo cual representa una interesante variación en la cobertura de esta clase; dicha variación también tiene una estrecha relación con las variaciones de cobertura de las otras clases analizadas.

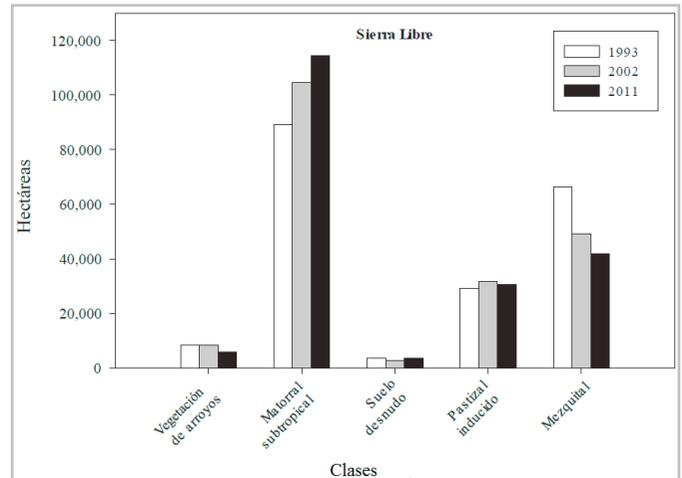


Figura 3. Cobertura por clase para los años de 1993, 2002 y 2011.

Figure 3. Class coverage for the years 1993, 2002 and 2011.

Adicionalmente se encontraron disminuciones en otros tipos de cobertura, como es el caso de la clase de Mezquital, el cual presentó una mayor disminución con cerca de 24,690 ha entre el periodo de estudio, y abarcando cerca del 32% del área de estudio para el 2011 (Figura 3).

Cambio de Cobertura de Uso del Suelo

Aun cuando la extensión de praderas de zacate buffel no ha variado con tiempo en Sierra Libre, éstas han causado modificaciones en la cobertura y uso del suelo. Utilizando las

clasificaciones generadas se analizó 1) la cantidad de área de Matorral Subtropical, Vegetación de arroyos, Mezquital y Suelo Desnudo, que fueron transformadas a Pastizal Inducido y 2) la cantidad de área que cambio de Pastizal Inducido hacia las otras clases, entre el periodo 1993 - 2002, 2002 -2011 y 1993 - 2011. De acuerdo a lo anterior se contabilizaron las hectáreas para cada transformación (Tabla 4).

Tabla 4. Cantidad de hectáreas de las clases transformadas de otras clases a Pastizal Inducido y viceversa (ver clave del tipo de cobertura en tabla 2).

Table 4. Amount of hectares transformed to Induced Grassland and viceversa (see key of the type of coverage in table 3).

Tipo de Cambio	1993 – 2002 (ha)	2002 – 2011 (ha)	1993 – 2011 (ha)
VA > PI	326.79	675.18	522.99
MS > PI	2,611.26	2,853.45	2,642.31
SD > PI	951.03	993.42	1,143.81
MZ > PI	15,263.01	12,388.32	14,019.57
PI > VA	233.28	210.15	178.83
PI > MS	2,279.34	7,491.78	5,955.30
PI > SD	1,271.25	895.59	903.42
PI > MZ	13,129.02	9,231.66	9,970.47

Mediante la comparación de los mapas temáticos generados, fue posible diferenciar las tendencias entre 1993 y 2011, en donde se observó que ocurrieron cambios hacia pastizal en todas las clases. Sin embargo, los mayores cambios registrados ocurrieron entre la clase de Mezquital y Pastizal Inducido, mientras que los cambios en otras clases fueron en menores magnitudes (Tabla 4). Las dinámicas de cambio registradas entre las clases de Mezquital y el Pastizal Inducido, pueden deberse a la localización de los mezquital, ya que, por lo general estos se encuentran en las planicies, y de acuerdo a lo reportado por Arriaga et al. (2000) para Sierra Libre, estas áreas son las que presentan una mayor transformación hacia Pastizal Inducido con fines ganaderos. Lo anterior se puede observar en los mapas de clasificación y en el mapa de cambios (Figura 2 y Figura 4), donde el Pastizal Inducido aparece en 2011 en muchos sitios que previamente fueron clasificados como Mezquital en 1993.

En el Matorral Subtropical se observaron cerca de 2,642 ha, esto es comparativamente menor a la de las otras clases, lo cual puede deberse a que generalmente este tipo de cobertura se encuentra en las partes más altas de la Sierra Libre, siendo estas áreas donde la implementación de zacate buffel no es muy común. Particularmente en el caso de la Vegetación de Arroyos, cerca de 500 ha entre 1993 y 2011 fueron transformadas a pastizales inducidos. Lo anterior es de esperarse, pues la extensión de terreno ocupada por la Vegetación de Arroyos es relativamente pequeña para el área de estudio, y las comunidades presentes en estas zonas tienen una mejor adaptación a estas condiciones que los otros tipos de vegetación presentes en la zona.

Dentro de la clase de Suelo Desnudo también se registraron transformaciones hacia el pastizal, con casi 1,143 ha entre el periodo de estudio. Posiblemente esto se deba a que

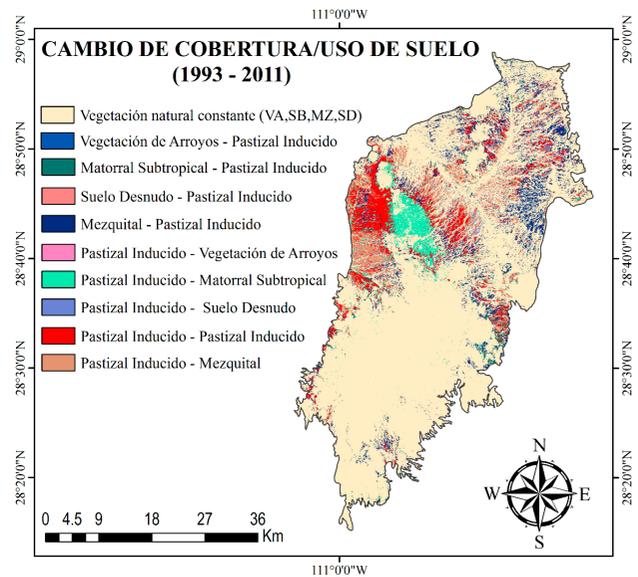


Figura 4. Cambios de cobertura/uso de suelo de 1993 a 2011 en Sierra Libre.

Figure 4. Changes in land cover/land use from 1993 to 2011 in Sierra Libre.

las condiciones particulares de esta clase son más propicias para la implementación del pastizal. El no contar con otras especies en estas áreas, ya sea de manera natural o por desmonte, aumenta la probabilidad del establecimiento exitoso del zacate buffel (Patrocipes, 1995).

Dentro del análisis, también se observaron cambios de la clase de Pastizal Inducido hacia las demás clases. El mayor cambio neto ocurrió entre el Pastizal Inducido y el Mezquital, con un total de 9,970 ha. Otros cambios de este tipo se presentaron con 5,955 ha transformadas a Matorral Subtropical, seguido por la clase de Suelo Desnudo con 903.42 ha y por último la Vegetación de Arroyos con 178,83 ha (Tabla 4).

Tomando en cuenta lo anterior, el cambio neto registrado desde el Mezquital hacia el Pastizal Inducido, resultó en una pérdida de cobertura para el Mezquital, de 4,049 ha. Mientras que para el Matorral Subtropical la cantidad de cambio neto entre esta clase y el Pastizal Inducido resultó en una ganancia de 3,313 ha entre 1993 y 2011. Otros cambios ocurrieron también en las clases de Vegetación de arroyos y Suelo Desnudo. Para el caso de la Vegetación de Arroyos, se observó un cambio neto de 344 ha de ganancia de cobertura para el Pastizal Inducido.

Por otra parte, en la clase de Suelo Desnudo se observó un cambio neto total de 240 ha de ganancia para el Suelo Desnudo. Estos cambios son comparativamente menores a los que se registraron para las otras clases. Lo anterior, explica el aumento de cobertura que presentó el Pastizal Inducido, el cual fue de 1,320.66 ha de 1993 a 2011.

Con anterioridad, Franklin y colaboradores (2006) estimaron que cerca de 140,000 ha de zacate buffel cubren el Desierto Sonorense desde 1973 hasta el 2000. Reportando que las áreas con presencia de buffel han aumentado su cobertura en un 82% en este periodo de tiempo. Sin embargo, en el caso de Sierra Libre, la cantidad de pastos inducidos no

aumento drásticamente durante el tiempo que abarcó este estudio (1993 - 2011). Los resultados obtenidos, representan una oportunidad para estudios a futuro, ya que dentro de la literatura referente a pastizales inducidos en el Desierto Sonorense (Franklin et al., 2006; Nagler et al., 2009; Brenner et al., 2012), no existe ningún reporte que se enfoque al monitoreo o cuantificación sobre otros tipos de cambios como el cambio desde pastizales inducidos hacia otros tipos de vegetación natural como Mezquital y Matorral Subtropical, ni a los posibles factores que tienen influencia en dichos cambios.

Los cambios de cobertura/uso de suelo asociados al Pastizal Inducido detectados en este estudio, no representan un porcentaje importante en cuanto al total del área de estudio. Sin embargo, las consecuencias del cambio de cobertura asociado a la introducción de pastos exóticos, influye en aspectos claves de la funcionalidad de los ecosistemas, al provocar cambios en la vegetación (Búrquez y Martínez-Yrizar, 1997; Castellanos et al., 2010). Lo anterior resalta la importancia de seguir estudiando los cambios a nivel de paisaje debido a la implementación del zacate buffel en la región central de Sonora y el resto del Desierto Sonorense.

CONCLUSIONES

La utilización de una clasificación supervisada y el modelo de CART para clasificar la cobertura y uso de suelo, permitió la generación de mapas temáticos precisos (82%), mediante los cuales fue posible analizar las dinámicas del paisaje asociado a la implementación de pastos exóticos en Sierra Libre. Los resultados obtenidos en este estudio han contribuido a comprender la distribución de la cobertura/uso de suelo en la Sierra Libre durante los últimos 18 años.

En este estudio, fue posible observar que las áreas destinadas a la ganadería o que tenían la presencia de pastizales inducidos (*Cenchrus ciliaris* L.) no mostraron un aumento importante en su extensión entre los años de 1993 y 2011. Asimismo, se logró observar que el intercambio (en área) entre pastizales inducidos y otros tipos de vegetación es muy dinámico.

La actividad ganadera es uno de los ejes económicos más importantes de la región, con una demanda de producción alta; por lo tanto, no se espera una disminución considerable en cuanto al área ocupada por zacate buffel en los próximos años. Sin embargo, la dinámica de dispersión y expansión de la especie, podría desembocar en el incremento del área ocupada por este tipo de vegetación en el área de estudio. Al igual que muchas de las áreas prioritarias para la conservación de nuestro estado, la Sierra Libre posee una gran cantidad de características ecológicas y biológicas especiales, sin embargo, y a pesar del estatus que posee esta región, se encuentra desprovista de protección, planes de manejo, legislación y/o regulación. Es importante resaltar, que los cambios en la cobertura y el uso del suelo, son los principales componentes del cambio global a nivel local, regional, en las zonas áridas y semiáridas en todo el mundo, por lo cual existe una gran necesidad de entender estos cambios y demás procesos ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONABIO por su apoyo a este trabajo mediante el proyecto "Estequiometría ecológica y percepción remota para el análisis espacial de la distribución e invisibilidad del zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*) en áreas prioritarias del noroeste de México". Los autores agradecen a CONACYT por la beca otorgada a Ana Karen Bustamante Icedo para culminar sus estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- Anderson, J., Hardy E., Roach J. T. y Witmer R. E. 1976. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. U.S. Geological Survey, Washington, DC.
- Arámbula, L. T. 2005. Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 4(2):17 -21.
- Arriaga, L, Espinoza J.M, Aguilar, C., Martínez E, Gómez L y Loa E. 2000. Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México.
- Arriaga, L., Castellanos, A. E., Moreno, E. y Alarcón, J. 2004. Potential ecological distribution of alien invasive species and risk assessment: a case study of buffel grass in arid regions of Mexico. *Conservation biology*, 18(6), 1504-1514.
- Asner, G. P., Keller M., Pereira Jr R., Zweede, J.C. 2002. Remote sensing of selective logging in Amazonia: Assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM+, and textural analysis. *Remote Sensing of Environment* 80: 483-496.
- Bravo Peña, L.C., Doode Matsumoto, O. S., Castellanos Villegas, A. E. & Espejel Carbajal, I. 2010. Políticas rurales y pérdida de cobertura vegetal: Elementos para reformular instrumentos de fomento agropecuario relacionados con la apertura de praderas ganaderas en el noroeste de México. *Región y sociedad*, 22(48): 3-35.
- Brenner, J. C., Christman, Z., & Rogan, J. 2012. Segmentation of Landsat Thematic Mapper imagery improves buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) pasture mapping in the Sonoran Desert of Mexico. *Applied Geography*, 34: 569-575.
- Búrquez, A, y Martínez-Yrizar, A. 1997. Conservation and landscape transformation in Sonora, Mexico. *Journal of the Southwest*, 371-398.
- Búrquez, A, y Martínez-Yrizar, A. 2006. Conservación, transformación del paisaje y biodiversidad en el noroeste de México. Manejo, conservación y restauración de recursos naturales en México. *Perspectivas desde la investigación científica*. Siglo XXI Editores, México DF. pp 85 – 110.
- Camou Healy, E. 1990. Sonora: una ganadería para la exportación.
- Caprioli, M. y E. Tarantino. 2001. Accuracy assessment of per-field classification integrating very fine spatial resolution satellite imagery with topographic data. *Journal of Geospatial Engineering* 3: 127-134.
- Castellanos, A E., Yanes, F., & Valdez-Zamudio, D. 2002. Drought-tolerant exotic buffel grass and desertification. In *Weeds Across Borders: Proceedings of a North American Conference* (Tucson, AZ, USA, 1-3 May 2002) pp. 99-112. University of Arizona Press.
- Castellanos-Villegas, A. E., Bravo L.C., Koch, G.W., Llano J., López D., Méndez R., Rodríguez J. C., Romo J. R. 2010. Impactos

- ecológicos por el uso del terreno en el funcionamiento de ecosistemas áridos y semiáridos. En: Molina-Freaner F. E., T. R. Van-Devender (eds), *Diversidad Biológica de Sonora*. UNAM, Mexico, DF, pp 157-186.
- Chander, G, Markham, B. L., & Barsi, J. A. 2007. Revised Landsat-5 thematic mapper radiometric calibration. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 4(3), 490-494.
- Congalton, R. G. 1991. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment* 37:35-46.
- Foody, G. M. 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment* 80: 185- 201.
- Franklin, K. A., Lyons, K., Nagler, P. L., Lampkin, D., Glenn, E. P., Molina-Freaner, F., & Huete, A. 2006. Buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) land conversion and productivity in the plains of Sonora, Mexico. *Biological Conservation*, 127(1), 62-71.
- Franklin, K, y Molina-Freaner, F. 2010. Consequences of buffelgrass pasture development for primary productivity, perennial plant richness, and vegetation structure in the drylands of Sonora, Mexico. *Conservation Biology*, 24(6), 1664-1673.
- Huete, A. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25: 295-309.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 195-213.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2011. Guía para la interpretación de cartografía. Uso de suelo y vegetación: Escala 1:250 000 Serie V. México. Disponible en:http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/ususuelo/doc/guia_interususuelov.pdf.
- Justice, C., Belward, A., Morisette, J., Lewis, P., Privette, J., & Baret, F. 2000. Developments in the validation of satellite sensor products for the study of the land surface. *International Journal of Remote Sensing*, 21(17), 3383-3390.
- López, E. P., y de la Fuente, G. M. C. 2003. Ganadería en el desierto: estrategias de sobrevivencia entre los ejidatarios de la Costa de Hermosillo, Sonora, México. *América Latina en la Historia Económica*, 10(2), 113-128.
- Lyons, K., Maldonado-Leal, B., & Owen, G. 2013. Community and ecosystem effects of buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) and nitrogen deposition in the Sonoran Desert. *Invasive Plant Science and Management*, 6(1), 65-78.
- Mas, J. F. 1999. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *International journal of remote sensing*, 20(1), 139-152.
- Nagler, P., Glenn, E., Franklin, K., Lampkin, D. y Huete, A. 2009. Remote sensing methods to monitor buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) and native ecosystem productivity in the plains of Sonora, Mexico. *Invasive plants on the move: Controlling them in North America*, pp 265-274.
- Patrocipes 1995. Guía práctica para el establecimiento, manejo y utilización del zacate buffel. Gobierno del Estado de Sonora/UGRS/Sagar [Consultado el 12 de Septiembre del 2016] Disponible en: <http://patrocipes.org.mx/publicaciones/pastizales/P95009.php>.
- Perramond, E. P. 2001. La ganadería sonorensis y los cambios ecológicos: una propuesta. *Historia ambiental de la ganadería en México*, pp 108-113.
- Rodríguez-Galiano, V y Chica-Rivas, M. 2012. Clasificación de imágenes de satélite mediante software libre: Nuevas tendencias en algoritmos de Inteligencia Artificial. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Madrid, AGE-CSIC, pp 19-21.
- Romo-León, J. R., Van Leeuwen, W. J. D., Castellanos, A. 2013. Percepción remota para el análisis de la distribución y cambios de uso de suelo en zonas áridas y semiáridas. En: Sánchez-Flores, E. y Díaz-Caravantes, R. E. (Eds.), *Dinámicas Locales del Cambio Ambiental Global*. pp 1-27.
- Romo-León, J.R., Van Leeuwen, Willem J. D., Castellanos, A. E. 2014. Using remote sensing tools to assess land use transitions in unsustainable arid agro-ecosystems. *Journal of Arid Environments* 106. 27- 35.
- Rzedowski, J. 2006. *Vegetación de México*. 1° edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. pp 504.
- Vergés, F., Damián, J., y Bocco, G. 2009. Contribución al análisis del cambio de uso del suelo y vegetación (1978-2000) en la Península de Baja California, México. *Investigación ambiental Ciencia y política pública*, Volumen 1 (1).
- Vitousek, P., Mooney M., Lubchenco, H y Melillo, J. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277(5325), pp 494-499.
- Villarreal, M. L, Van Leeuwen, W y 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: 4266-4290.