

Impacto del sistema zanja bordo sobre la cobertura vegetal en pastizales de la región Mixteca, estado de Oaxaca

Impact of the ditch check dam system over the vegetation coverage of grasslands in the Mixteca region, State of Oaxaca

Alejandra Reyes Carrillo¹, Mario R. Martínez Menez^{1†}, Erasmo Rubio Granados^{1‡},
Edmundo García Moya² y Adolfo A. Exebio García¹

¹ Postgrado de Hidrociencias, ² Postgrado de Botánica, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

[†] Autor para correspondencia (sisacop@gmail.com)

RESUMEN

En los agostaderos de México no se regula la carga animal de acuerdo con los coeficientes de agostadero estimados a partir de cobertura y productividad, lo que ha provocado la degradación de la cobertura vegetal, la reducción de la infiltración y capacidad de almacenamiento del agua en el suelo, el incremento de los escurrimientos superficiales y la erosión que afecta la productividad del agostadero y la producción de biomasa, además de la proliferación de plantas con menor apetencia y calidad proteínica. Para atenuar la degradación de los pastizales se han establecido acciones de conservación del suelo y agua. En este trabajo se evaluó el impacto del sistema zanja bordo sobre la cobertura vegetal en el pastizal de la cuenca rancho Dolores de la región Mixteca del estado de Oaxaca. Los cambios de la cobertura vegetal se estimaron con los porcentajes de cobertura verde, seca y total, producción de biomasa, índices de vegetación y composición florística en tres polígonos con obras y cinco sitios de muestreo (entre zanja, inicio, zanja, bordo y pie) y en tres zonas sin obras con tres sitios de muestreo (parte alta, media y baja). La producción de biomasa en el bordo y la zanja fue de 2.38 Mg ha⁻¹ y 2.29 Mg ha⁻¹ con diferencias estadísticas entre los sitios de entre zanjas, inicio y pie; los porcentajes de cobertura vegetal, el IVPN, NDVI y SAVI no mostraron diferencias significativas. El testigo mostró diferencias significativas en la producción de biomasa y porcentaje de cobertura, pero los índices de vegetación fueron iguales. En áreas con obras, la especie dominante fue

Melinis repens, con potencial forrajero bajo; en áreas testigo la especie dominante fue *Bouteloua griffithsii*, de regular potencial forrajero. El Procedimiento de Permutación de Respuesta Múltiple indica que existe diferencia en la composición florística de sitios con obras y testigo.

Palabras clave: composición florística, índices de vegetación, obra de conservación del suelo, radiómetro espectral, vegetación.

SUMMARY

In Mexico, the foraging-stock load in pastures is not regulated according to stocking rates, which are estimated in terms of coverage and productivity; this situation has led to the degradation of the vegetation coverage, the reduction of infiltration and water storage capacity in the soil, and the increase of surface runoffs and erosion, which affect the pasture productivity and biomass production, and promote the proliferation of plants with lower palatability and protein quality. Actions to endorse the conservation of soil and water have been implemented in order to mitigate grassland degradation. In this research, the impact of the ditch check dam (DCD) system over the vegetation coverage was evaluated in grasslands of the watershed from rancho Dolores, in the Mixteca region of the State of Oaxaca. Changes in the vegetation coverage were estimated according to percentages of green, dry and total coverage, biomass production, vegetation indexes, and floristic composition in three polygons with DCD at

Cita recomendada:

Reyes Carrillo, A., M. R. Martínez Menez[†], E. Rubio Granados, E. García Moya y A. A. Exebio García. 2019. Impacto del sistema zanja bordo sobre la cobertura vegetal en pastizales de la región Mixteca, estado de Oaxaca. *Terra Latinoamericana* 37: 231-242.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.327>

Recibido: 20 de julio de 2017.

Aceptado: 14 de marzo de 2019.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 37: 231-242.

five sampling sites (among-ditch, starting point, ditch, check dam, and foot) and in three polygons without DCD at three sampling sites (upper, central and lower portions). Biomass production in the check dam and ditch was 2.38 Mg ha⁻¹ and 2.29 Mg ha⁻¹ respectively, with significant differences among the following sites: among-ditch, starting point, and foot; the percentages of vegetation coverage, IVPN, NDVI and SAVI did not show significant differences. The control presented significant differences in biomass production and coverage percentage; however, the vegetation indexes did not vary. In areas with DCD, the dominant species was *Melinis repens* with low forage potential; in control areas, the dominant species was *Bouteloua griffithsii*, with regular forage potential. The Multiple Response Permutation Procedure indicated significant differences in the floristic composition among sites with DCD and the control.

Index words: floristic composition, spectral radiometer, vegetation indices, vegetation, work of soil conservation.

INTRODUCCIÓN

La degradación y desertificación son procesos naturales, cuya magnitud se acelera con la actividad humana y en medida que se agravan se convierten en problemas ambientales y sociales (Cotler *et al.*, 2007; Higginbottom y Symeonakis, 2014; Zhou *et al.*, 2016). En México, el 85% de la superficie muestra procesos de degradación del suelo, de este total, 22.7 millones de ha (11.9% del total) es atribuible a la erosión hídrica y 18.2 millones de ha (9.5%), resto corresponde a la degradación química y física (SEMARNAT-CP, 2003). La erosión ocasiona pérdida del horizonte superficial del suelo y reduce su calidad y capacidad productiva (Rodríguez *et al.*, 2004; Higginbottom y Symeonakis, 2014). En pastizales, el proceso de erosión es una consecuencia de la reducción en la cubierta vegetal por el sobre pastoreo.

Para evitar la degradación de los suelos en los pastizales, además del manejo del suelo y la vegetación es importante conocer y estimar los coeficientes de agostaderos que se estiman con la altura, cobertura, frecuencia y densidad de especies y producción de biomasa (Thomson *et al.*, 1998; Contreras *et al.*, 2003). Otras técnicas consideran el uso de Índices de Vegetación (IV) estimados a partir de datos de reflectancia para

estimar la cobertura vegetal. Estas metodologías son adecuadas para estimar la producción forrajera bajo las condiciones actuales de manejo del agostadero para definir el número de cabezas de ganado por unidad de superficie. En la mayor parte de los agostaderos de México no se regula la capacidad de carga animal (CCA) de acuerdo con los coeficientes de agostadero estimados para cada condición, lo que ha provocado la degradación de la cobertura vegetal, la productividad del agostadero, el desarrollo de plantas con menor apetencia y calidad protéinica y los incrementos de los escurrimientos superficiales y la erosión de los suelos.

Wylie *et al.* (1995) utilizaron los IV estimados de imágenes de satélite, para determinar la producción de forraje en pastizales de Níger y encontraron una CCA promedio de 23 unidad animal (UA) ha⁻¹, con variaciones estacionales de 6 a 100 UA ha⁻¹ en el año. Medina *et al.* (2009) correlacionaron los IV con la producción de biomasa herbácea en agostaderos con diferentes condiciones de cobertura en Zacatecas y encontraron que la CCA varió de 0.10 a 0.30 UA ha⁻¹. Villa *et al.* (2014), estimaron una CCA de 5 a 18 UA ha⁻¹ para pastizal y matorral, para el estado de Coahuila, resultados comparables a los referidos por Comisión Técnica de Coeficientes de Agostaderos (COTECOCA) y concluyeron que los IV son adecuados para estimar la producción de biomasa en el estrato herbáceo, pero presenta algunas limitaciones para el estrato arbustivo ya que no consideran el efecto del ramoneo.

La aplicación de los IV para estimar la producción de biomasa se ha generalizado a través de modelos de regresión lineal que son aplicables en pastizales a escalas regionales, pero presentan limitaciones cuando la producción de biomasa es superior a los 500 g m⁻² (Olson y Cochran, 1998).

En México para reducir las pérdidas de suelo en pastizales se han implementado acciones de conservación como las zanjas bordo, las cuales cubren del 35 al 50% de la superficie trabajada en diferentes condiciones de suelos, topografía y clima (Magaña y Diakite, 2007). A pesar de la magnitud de la superficie trabajada con estas obras, existen pocos estudios que muestren su impacto sobre la cobertura vegetal.

Los resultados de las evaluaciones de las zanjas bordo en México indican que retienen en promedio de 512.2 a 696.79 m³ ha⁻¹ de sedimentos y reducen la erosión en un 84% (Magaña y Diakite, 2007; Torres *et al.*, 2010). Cotler *et al.* (2013) reportaron que los indicadores de productividad y regulación del agua

en el suelo como densidad aparente, carbono total, nitrógeno, porosidad y contenido de humedad no mejoró después de cuatro años de establecidas las zanjas bordo en diferentes regiones de México en comparación con los sitios de control. Cotler *et al.* (2015) señalaron que la construcción de zanjas genera impactos negativos como la remoción de suelo por excavación para conformar el bordo y la exposición de 0.42 a 0.63 Mg de carbono orgánico.

Singh *et al.* (2011) evaluaron la eficiencia de diferentes prácticas de restauración de suelo, entre ellas las zanjas bordo, en áreas de pastizales degradados con pendientes que variaron de menos de 10% a más de 20% en la India. Los terrenos con obras reportaron mayores contenidos de humedad del suelo (7.6% promedio) en comparación con el área control. La riqueza y diversidad de las especies vegetal en la parte baja del sistema zanja bordo fue mayor en 2.7 y 2.9% respectivamente en relación con la parte alta. La dominancia de especies presentó una tendencia decreciente de la parte alta a la parte baja de la ladera, la altura de la vegetación fue mayor en la parte media, seguida por la parte baja y fue menor en la parte alta. El peso del forraje en verde y seco en promedio fue 1.52 y 1.56 veces mayor en la parte baja que en la parte alta del sistema. La producción de biomasa (de la parte alta a la parte baja) en las áreas con obras se incrementó 2.13, 1.65 y 1.97 veces, en pendientes <10%, de 10 a 20% y >de 20%, en comparación con las áreas control.

El establecimiento de obras en Rajasthan, India, incrementó el contenido de humedad en el suelo (CHS) con valores que fluctuaron de 14 a 24.2% comparado con parcelas testigo; en pendientes >20% y <10%, los CHS fueron 14.0 y 51.4% mayores a las zonas con pendiente de 10 a 20%. Los incrementos en la humedad del suelo favorecieron el desarrollo en altura y diámetro de la especie *Emblica officinalis* Gaertn, empleada para la restauración de áreas degradadas (Singh *et al.*, 2012). También se observó mayor contenido de humedad en el suelo en pendientes <10%, en dos periodos evaluados, con incrementos de 24.3 y 58.9 % en diciembre y de 21.1 y 29.4% en junio 2013).

La región Mixteca Oaxaqueña presenta erosión en 95% de la superficie, provocada por actividades agrícolas y ganaderas, en particular por el sobrepastoreo (Cruz y Aguirre 1992; Contreras *et al.*, 2003, 2005); por lo cual, la producción de biomasa en pastizales es de 2.8 Mg ha⁻¹ (Fernández *et al.*, 2013). En esta región se han construido zanjas bordo con la finalidad de

reducir los escurrimientos superficiales, incrementar la infiltración del agua en el suelo, incrementar la humedad, para favorecer el desarrollo de cobertura forrajera y reducir la erosión del suelo. En este trabajo, se evaluó el impacto del sistema zanja bordo sobre el desarrollo de la cobertura vegetal y la correlación de la producción de biomasa con los IV en áreas de pastizal, en la Región Mixteca, del estado de Oaxaca.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica en la cuenca de rancho Dolores de la Mixteca Oaxaqueña entre las coordenadas 17° 49' 52.7" y 17° 54' 15.3" N y 97° 48' 40.4" y 97° 45' 7.8" O, a una altitud entre 1660 a 2000 m y cubre una superficie de 1853.17 ha. En la cuenca se identificaron cinco tipos de vegetación: bosque de encino en 556 ha (30.59%), 551 ha de pastizales (29.70%), selva baja caducifolia en 403 ha (21.76%), matorral en el 9%, y zonas agrícolas en el 8.8%, el resto son asentamientos humanos. La precipitación media es de 681 mm; la temperatura media anual de 21 °C; los suelos son Regosol (93.52%) y Vertisol (6.48%) (INEGI, 2006); y la pendiente varía de 0 a más del 40%. Los pastizales se localizan en la parte media y baja de la cuenca, entre las coordenadas 17° 49' 58.038" y 17° 53' 18.799" N y 97° 47' 35.857" y 97° 45' 17.458" O, en esta área se delimitaron los polígonos que se establecieron con zanja bordo en 80.43 ha (15% del pastizal) entre el 2005 y 2007.

Para evaluar el impacto de las obras sobre la cobertura vegetal, se seleccionaron tres polígonos con el sistema zanja bordo y tres polígonos sin obras (testigo). Las condiciones en las que se establecieron los polígonos las zanjas bordo en la zona de estudio fue variable en cuanto a la profundidad de suelo, forma de los predios y pendiente del terreno, estas diferencias afectaron la distribución de las zanjas en el terreno, y su efectividad en la productividad del agostadero y en la repoblación vegetal. La construcción de las zanjas generó disturbios por la excavación y depósito de materiales, creando condiciones diferentes a las originales del terreno. Con la excavación se formaron zanjas para captar agua y sedimentos, modificando la composición textural del fondo y con el material excavado se formaron los bordos con suelo y material parental; estas modificaciones tuvieron efectos importantes en la producción de biomasa.

Se determinó la producción de biomasa y se

registraron las especies vegetales presentes en el estrato herbáceo. En los polígonos con obras se seleccionaron tres zanjas bordo distribuidas en la parte alta, media y baja, en cada sistema zanja bordo se ubicaron cinco sitios de muestreo: la entre zanja (EZ), inicio (I), zanja (Z), bordo (B) y pie (P). En los polígonos sin obras, los sitios de muestreo se establecieron en la parte alta, media y baja (Figura 1). Los muestreos de vegetación se realizaron al final (FPL) e inicio del periodo de lluvias (IPL) (noviembre del 2015 y julio del 2016) y en el período seco (PS) (abril del 2016).

En los polígonos con y sin obras se realizaron mediciones de reflectancia y se tomaron y analizaron imágenes a nadir. La reflectancia se midió con el radiómetro Cropscan, Inc. Modelo MSR16R de cinco bandas espectrales (azul, verde, rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio); las imágenes a nadir se capturaron con una cámara digital SONY de 10.1 mega píxeles. Las determinaciones con el radiómetro y la cámara digital se hicieron a 3.20 m de altura, en un diámetro de 1.6 m y una superficie de 2.01 m².

Con los datos de reflectancia, se calculó el índice de vegetación de pendientes normalizadas (IVPN) (Villa *et al.*, 2014), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Rouse *et al.*, 1974) y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) (Huete, 1988).

Las imágenes nadir se procesaron en ENVI Classic 32 bit, para determinar los porcentajes de cobertura verde (CV), seca (CS) y total (CVT) con una clasificación supervisada por el método de máxima verosimilitud.

En cada polígono se determinó la producción de biomasa (PB) en un área de 1 m² y se establecieron cuatro sitios de muestreo de 0.25 m² (cuadrantes de 0.5 × 0.5 m) donde se registró la presencia de especies herbáceas de hoja ancha, gramíneas forrajeras y gramíneas no forrajeras. Se colectó un ejemplar por especie registrada que se colocó en una prensa botánica y se llevó al herbario para identificación. Para la identificación de especies se utilizó la guía de la Flora de Tehuacán - Cuicatlán (Pérez, 2011) y la Flora Fanerógama del Valle de México Rzedowski

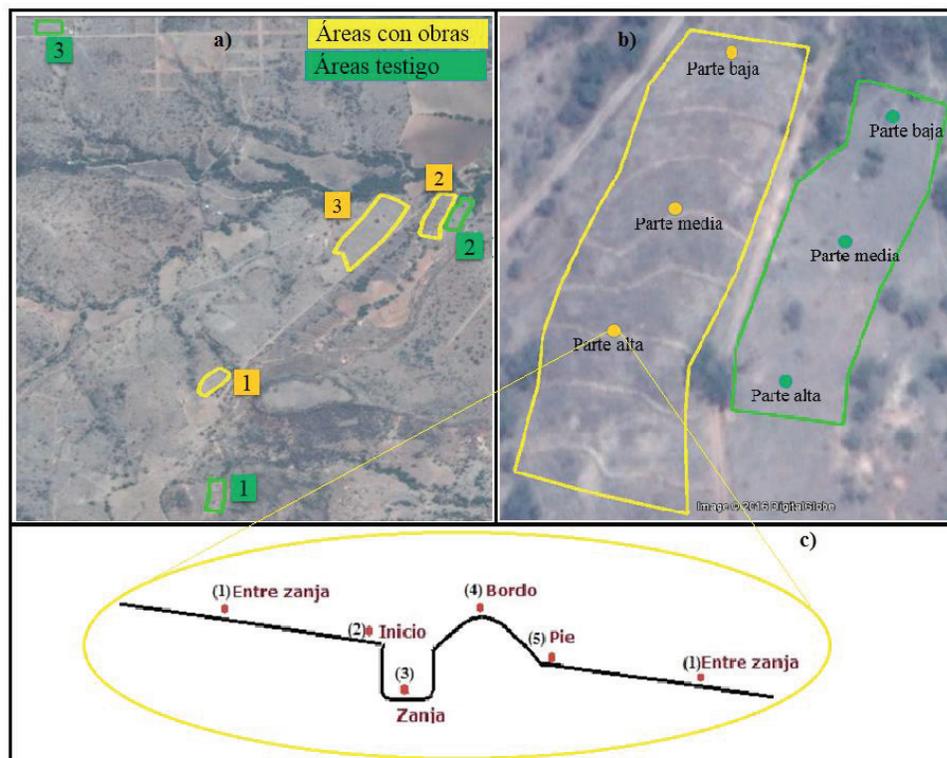


Figura 1. a) Polígonos de muestreo; b) Distribución de las obras evaluadas y sitios de muestreo en polígonos testigo; c) Sitios de muestreo en el sistema zanja bordo.

Figure 1. a) Sampling polygons; b) Distribution of the sites with DCD evaluated and sampling sites in control polygons; c) Sampling sites in the ditch check dam system.

et al. (2005), entre otros. El muestreo de vegetación se realizó al final del periodo de lluvias (FPL), en seis parcelas en entre zanja (EZ), ocho en bordo (B), ocho en zanja (Z) y 16 en pastizales sin obras.

El análisis estadístico de los datos se realizó en el programa Minitab 17, inicialmente se aplicaron las pruebas de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha = 0.15$) y de Bartlett ($\alpha = 0.05$) para corroborar la homogeneidad y normalidad de los datos; con el procedimiento GLM se aplicó el análisis de varianza bifactorial; se hicieron comparaciones de medias por el método de Tukey ($\alpha = 0.05$) para las variables CV, CS, CVT, PB, IVPN, NDVI y SAVI para los sitios de muestreo dentro del sistema zanja bordo (EZ, I, Z, B y P) y comparar los sitios de entre zanja con el testigo. Se determinó la correlación entre CV, CS, CVT y PB con los IV.

Los datos de vegetación se analizaron para identificar la semejanza de la composición florística en el pastizal con obras y sin obras de acuerdo con el procedimiento propuesto por Mielke *et al.* (1981), en el programa PC-ORD v 6.0 (McCune y Mefford, 2011) con el Procedimiento de Permutación de Respuesta Múltiple.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cambios de Vegetación por Periodos, Polígono y Sitios de Muestreo en el Sistema Zanja Bordo

Los cambios de vegetación evaluados muestran que existen diferencias significativas ($P < 0.01$) entre periodos y polígonos con obras, pero no existen diferencia entre los sitios del sistema zanja bordo. Los valores promedio de porcentaje de cobertura vegetal total es mayor en el inicio del periodo de lluvia en comparación con los otros periodos. En contraste, el porcentaje de cobertura verde fue mayor en el periodo de lluvia (FPL y IPL) que el periodo seco y el porcentaje de cobertura seca fue más alta en el periodo seco. La producción de biomasa fue mayor en los periodos FPL y PS que el IPL por la variación del material seco y verde.

Los IV fueron más altos al inicio del periodo de lluvias en comparación con los otros periodos, lo cual coincide con Wylie *et al.* (1995), Medina *et al.* (2009) y Villa *et al.* (2014) quienes señalan que los IV permiten estimar los cambios de cobertura en diferentes épocas del año (Cuadro 1). Los porcentajes de cobertura (verde,

seca y total), la producción de biomasa y los índices de vegetación (IVPN, NDVI y SAVI) fueron más altos en el polígono uno y mostraron diferencias altamente significativas comparadas con los polígonos dos y tres lo cual sugiere que la variación de suelo y pendientes son importantes para el desarrollo de la vegetación como fue reportado por Fernández *et al.* (2013) (Cuadro 1).

Entre los sitios de muestreo del sistema zanja bordo no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los porcentajes de cobertura vegetal y producción de biomasa, lo cual se refleja en que no existen diferencia los valores de NDVI y SAVI, sin embargo, existe una diferencia promedio de 0.28 Mg ha^{-1} de producción de biomasa entre la zanja (Z) y la entre zanja (EZ), lo cual indica que las zanjas al captar agua incrementan la producción de biomasa como fue reportado Singh *et al.* (2011) (Cuadro 1).

Cambios de Vegetación entre Polígonos y Sitios de Muestreo en el Sistema Zanja Bordo

Considerando que existen diferencias estadísticas significativas entre la producción de biomasa (PB) entre polígonos con zanja bordo y que no existen en los sitios de muestreo del sistema, se analizó la interacción de polígonos con sitios de muestreo y se encontró que existen diferencias significativas de la producción de biomasa entre sitios de muestreo en los diferentes polígonos. En el polígono uno hubo más producción de biomasa en el inicio (I), seguido de la EZ en comparación con la Z, B y P, lo cual se explica porque los suelos son profundos. En el polígono dos, la zanja y la entre zanja reportaron la mayor producción de biomasa y diferentes a los sitios I, B y P. En el polígono tres el bordo tuvo mayor producción de biomasa, seguido de la zanja y diferentes a los sitios EZ, I y P (Cuadro 2). La producción de biomasa del sitio Z de los polígonos dos y tres tuvieron diferencias estadísticas significativas con el resto de los sitios de muestreo (EZ, I, B y P), lo que indica que las zanja bordo cumplen con los objetivos de captar agua y favorecer el desarrollo de la vegetación en suelos someros, como fue mencionado por Singh *et al.* (2011) (Cuadro 2).

La interacción polígono-sitio de muestreo, utilizando la prueba de Tukey, permitió encontrar que el polígono uno con suelos profundos reportó la mayor producción de biomasa, seguido del polígono dos y

Cuadro 1. Comparación de medias (Tukey $\alpha > 0.05$) entre períodos de muestreo, polígono y sitios en el sistema zanja bordo.
Table 1. Comparison of means (Tukey $\alpha > 0.05$) among sampling periods, polygon and sites in the ditch check dam system.

		N	CV	CS	CVT	PB	IVPN	NDVI	SAVI	
		----- % -----				Mg ha ⁻¹				
Periodo	FPL	52	32.64 A	42.2 B	74.84 B	2.35 A	0.48 B	0.48 B	0.66 B	
	PS	50	2.39 B	68.7 A	71.09 B	2.08 A	0.24 C	0.14 C	0.20 C	
	IPL	45	36.54 A	45.68 B	82.22 A	1.17 B	0.54 A	0.56 A	0.73 A	
Polígonos	1	48	32.16 A	49.74 A	81.90 A	2.52A	0.48 A	0.45 A	0.58 A	
	2	45	20.10 B	51.11 A	71.20 B	1.50 B	0.38 B	0.34 C	0.47 B	
	3	54	19.32 B	55.73 A	75.05 AB	1.59 B	0.41 B	0.40 B	0.54 A	
Sitios de muestreo	EZ	31	27.88 A	47.26 A	75.14 A	1.80 A	0.44 AB	0.39 A	0.53 A	
	I	31	23.51 A	56.41 A	79.92 A	1.92 A	0.45 A	0.41 A	0.52 A	
	Z	30	26.00 A	50.90 A	76.90 A	2.08 A	0.43 AB	0.41 A	0.55 A	
	B	29	22.04 A	52.52 A	74.56 A	1.94 A	0.38 B	0.38 A	0.52 A	
	P	26	19.87 A	53.87 A	73.74 A	1.61 A	0.41 AB	0.39 A	0.52 A	

CV = cobertura verde; CS = cobertura seca; CVT = cobertura vegetal total; PB = producción de biomasa (Mg ha⁻¹); IVPN = índice de vegetación de pendientes normalizadas; NDVI = índice de vegetación de diferencias normalizada; SAVI = índice de vegetación ajustado al suelo; FPL = final del periodo de lluvias; PS = periodo seco; IPL = inicio del periodo de lluvia; EZ = entre-zanja; I = inicio; Z = zanja; B = bordo; P = pie.
 CV = green coverage; CS = dry coverage; CVT = total vegetation coverage; PB = biomass production (Mg ha⁻¹); IVPN = vegetation index of normalized slopes; NDVI = normalized differences vegetation index; SAVI = vegetation index adjusted to the soil; FPL = end of the rainy season; PS = dry period; IPL = start of the rainy season; EZ = among-ditch; I = starting point; Z = ditch; B = check dam; P = foot.

con una menor producción en el polígono tres donde se encuentran los suelos someros. Esto coincide con Cotler *et al.* (2015), que señalan que la zanja y bordo tienen mayor efecto en la retención de humedad y producción de biomasa, en razón de las condiciones de los sitios donde se establecen las obras.

Cuadro 2. Comparación de medias (Tukey $\alpha > 0.05$) de producción de biomasa por polígonos y sitios de muestreo del sistema zanja bordo.

Table 2. Comparison of means (Tukey $\alpha > 0.05$) of biomass production per polygon and sampling site of the ditch check dam system.

Sitio	Producción de biomasa					
	----- Mg ha ⁻¹ -----					
	N	Polígono 1	N	Polígono 2	N	Polígono 3
EZ	9	2.81 AB	9	1.62 BCD	9	0.97 D
I	9	3.14 A	10	1.36 CD	9	1.26 CD
Z	9	2.07 ABCD	9	1.86 ABCD	9	2.29 ABCD
B	9	2.17 ABCD	9	1.26 CD	9	2.38 ABC
P	9	2.39 ABC	9	1.38 CD	9	1.07 CD

EZ = entre-zanja; I = inicio; Z = zanja; B = bordo; P = pie.
 EZ = among-ditch; I = starting point; Z = trench; B = check dam; P = foot.

Cambios de Vegetación entre Zanjas y Áreas de Control

La comparación de los cambios en la cobertura vegetal, producción de biomasa e índices de vegetación, es recomendable hacerlo con el sitio de entre zanjas (EZ) de los polígonos con obras y las parcelas control; los resultados del ANOVA, no muestran diferencias estadísticas significativas en estas variables, lo que indica que la PB en la parte media (entre zanja) del sistema zanja bordo no tiene diferencias significativas con el testigo, lo cual coincide con lo consignado por Cotler *et al.* (2015). Sin embargo, en el sitio EZ, la PB es mayor en 0.22 Mg ha⁻¹ a la mencionada en la zona de control (testigo), lo cual sugiere que existe un efecto de las zanjas bordo en la captación de agua de lluvia, no solo en la zanja sino en menor proporción en la parte media y alta del sistema como ha sido reportado por Singh *et al.*, 2011, 2012 y 2013 (Cuadro 3).

Cambios Identificados en la Interacción de Polígono y Sitios de entre Zanja y Testigo

La interacción de polígonos con sitios de muestreo (entre zanja y testigo) menciona diferencias significativas de los porcentajes de cobertura vegetal

Cuadro 3. Comparación de cobertura vegetal e índices de vegetación entre zanja y testigo.**Table 3. Comparison of vegetation coverage and vegetation indexes in among-ditch and control sites.**

Sitio de medición	CV	CS	CVT	PB	IVPN	NDVI	SAVI
	- - - - - % - - - - -			Mg ha ⁻¹			
EZ	27.88 A	47.26 A	75.14 A	1.80 A	0.44 A	0.39 A	0.53 A
T	25.09 A	48.72 A	73.81 A	1.58 A	0.43 A	0.41 A	0.56 A

CV = cobertura verde; CS = cobertura seca; CVT = cobertura vegetal total; PB = producción de biomasa (Mg ha⁻¹); IVPN = índice de vegetación de pendientes normalizadas; NDVI = índice de vegetación de diferencias normalizada; SAVI = índice de vegetación ajustado al suelo; FPL = final del periodo de lluvias; PS = periodo seco; IPL = inicio del periodo de lluvia; EZ = entre-zanja; T = testigo.

CV = green coverage; CS = dry coverage; CVT = total vegetation coverage; PB = biomass production (Mg ha⁻¹); IVPN = vegetation index of normalized slopes; NDVI = normalized differences vegetation index; SAVI = vegetation index adjusted to the soil; FPL = end of the rainy season; PS = dry period; IPL = start of the rainy season; EZ = among-trench; T = control.

(CV, CS) con un nivel de significancia $P < 0.01$ y el porcentaje de cobertura total (CVT) y producción de biomasa (PB) tuvieron diferencias a niveles de significancia de $P = 0.03$ y $P = 0.02$.

El polígono uno registró 9.26% más CVT y 1.03 Mg ha⁻¹ más en la PB en sitios de EZ que lo registrado en los sitios T, que muestra, aun sin diferencias estadísticas, un mejoramiento de las condiciones del suelo para el crecimiento de la vegetación. Los índices de vegetación no mostraron diferencias significativas (Cuadro 4).

El polígono dos, muestra diferencias significativas en el CS y CVT, los valores más altos se registraron en el testigo que la entre zanja y la CVT del testigo fue 15.79% mayor que en la entre zanja. El resto de las variables no mostraron diferencias significativas,

pero registraron los valores mayores altos en el testigo (Cuadro 4).

El polígono tres mostró diferencias significativas en la CV, CS y CVT, las últimas dos (CS y CVT) registraron los valores más altos en EZ en comparación con el testigo; por el contrario, la CV registro valores superiores en sitios T. La producción de biomasa no mostró diferencias significativas pero registraron valores superiores en los sitios Testigo (Cuadro 4).

Los resultados observados en el polígono uno son similares a los reportados en otros estudios donde las áreas testigo presentan condiciones menos favorables para el desarrollo de la vegetación, por el mayor contenido de humedad que incide en la producción de biomasa (Singh *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014). Por el contrario, en los polígonos dos y tres donde se

Cuadro 4. Comparación de medias (Tukey $\alpha > 0.05$) considerando la interacción de los polígonos con los sitios de entre zanja y testigo.**Table 4. Comparison of means (Tukey $\alpha > 0.05$) considering the interaction of polygons and among-ditch and control sites.**

Polígono contra sitio de medición	CV	CS	CVT	PB	IVPN	NDVI	SAVI
	- - - - - % - - - - -			Mg ha ⁻¹			
Polígono 1 – EZ	39.81 A	41.52 AB	81.33 AB	2.81 A	0.49 A	0.44 A	0.57 A
Polígono 1 – T	18.99 B	53.08 AB	72.07 ABC	1.77 AB	0.44 A	0.40 A	0.56 A
Polígono 2 – EZ	26.72 AB	49.05 AB	75.77 ABC	1.62 B	0.40 A	0.35 A	0.48 A
Polígono 2 – T	29.73 AB	61.83 A	91.56 A	1.70 B	0.44 A	0.42 A	0.52 A
Polígono 3 – EZ	17.11 B	51.20 AB	68.30 BC	0.97 B	0.42 A	0.38 A	0.55 A
Polígono 3 – T	26.54 AB	31.25 B	57.79 C	1.28 B	0.42 A	0.42 A	0.61 A

CV = cobertura verde; CS = cobertura seca; CVT = cobertura vegetal total; PB = producción de biomasa (Mg ha⁻¹); IVPN = índice de vegetación de pendientes normalizadas; NDVI = índice de vegetación de diferencias normalizada; SAVI = índice de vegetación ajustado al suelo; FPL = final del periodo de lluvias; PS = periodo seco; IPL = inicio del periodo de lluvia; EZ = entre-zanja; T = testigo.

CV = green coverage; CS = dry coverage; CVT = total vegetation coverage; PB = biomass production (Mg ha⁻¹); IVPN = vegetation index of normalized slopes; NDVI = normalized differences vegetation index; SAVI = vegetation index adjusted to the soil; FPL = end of the rainy season; PS = dry period; IPL = start of the rainy season; EZ = among-trench; T = control.

observaron valores más altos que en los sitios testigo y coincide con los resultados obtenidos. Cotler *et al.* (2015) mencionan que las zanjas no incrementan la retención de humedad en las EZ, por el contrario, los sitios sin obras presenta condiciones que contribuyen a retener la humedad y favorece el desarrollo de la cobertura vegetal. Estas interacciones sugieren que las condiciones del suelo y la topografía influyen en el desarrollo de la vegetación y que el sistema zanja bordo podría ayudar a incrementar la producción de biomasa, especialmente en la zanja bordo como fue reportado, sin embargo, el efecto del aumento de la humedad del suelo no se refleja en parte media (EZ) del sistema.

Correlaciones entre Cobertura Vegetal, Producción de Biomasa e Índices de Vegetación

La correlación entre las variables en sitios del sistema zanja bordo en general, fueron bajas excepto la CV con el IVPN, NDVI y SAVI, que fluctuaron de 0.75 a 0.80 y la CVT con los IV fueron significativas ($P < 0.01$) y variaron de 0.27 a 0.45 (Cuadro 5).

En sitios testigo y entre zanja, las correlaciones fueron altamente significativas entre los IV y CV, CS y CVT, excepto el SAVI con CVT; las correlaciones más altas se identificaron entre CV y el IVPN, NDVI y SAVI con $r = 0.85, 0.82$ y 0.73 . Las correlaciones obtenidas son similares a las reportadas entre cobertura arbórea y IV estimados mediante imágenes de satélite donde r varían de 0.62 a 0.79 (Aguirre *et al.*, 2011); esto se debe a que las bandas rojo e infrarrojo cercano tienen mayor respuestas a la vegetación verde. Los porcentajes de cobertura seca y cobertura total muestran correlaciones significativas con los IV, el $r = 0.54$ fue el más alto registrado en sitios T y EZ (Cuadro 5).

La PB no presentó correlación con los IV, lo cual coincide con Huete y Jackson (1987) quienes mencionaron que la reflectancia registrada en campo en pastizales de zonas áridas no mostraron una tendencia asociada a lo obtenido con los sensores empleados.

No existe una relación directa entre IV y la producción de biomasa, ya que la producción de biomasa puede variar de 0.20 gr a 2 kg, mientras el NDVI permanece constante en 0.85, esto se atribuye

Cuadro 5. Matriz de correlación entre CV, CS, CVT y PB con IV en los sitios de muestreo.

Table 5. Correlation matrix among CV, CS, CVT and PB with IV in the sampling sites.

Sitios del sistema zanjas bordo (entre zanja. inicio. zanja. bordo y pie)													
Variable	CV		CS		CVT		IVPN		NDVI		SAVI		
	----- % -----												
	r	P-Value	r	P-Value	r	P-Value	r	P-Value	r	P-Value	r	P-Value	
CS (%)	-0.70	0.00											
CVT (%)	0.43	0.00	0.35	0.00									
IVPN	0.80	0.00	-0.49	0.00	0.44	0.00							
NDVI	0.80	0.00	-0.48	0.00	0.45	0.00	0.94	0.00					
SAVI	0.75	0.00	-0.57	0.00	0.27	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00			
PB (Mg ha ⁻¹)	0.07	0.43	0.06	0.47	0.17	0.05	-0.04	0.66	-0.07	0.43	-0.09	0.31	
Sitios de entre zanja y testigo													
CS (%)	-0.65	0.00											
CVT (%)	0.36	0.01	0.48	0.00									
IVPN	0.85	0.00	0.54	0.00	0.32	0.02							
NDVI	0.82	0.00	0.54	0.00	0.29	0.03	0.96	0.00					
SAVI	0.73	0.00	-0.64	0.00	0.05	0.70	0.90	0.00	0.95	0.00			
PB (Mg ha ⁻¹)	0.04	0.80	0.10	0.47	0.17	0.23	-0.03	0.84	-0.01	0.93	0.01	0.94	

CV = cobertura verde; CS = cobertura seca; CVT = cobertura vegetal total; PB = producción de biomasa (Mg ha⁻¹); IVPN = índice de vegetación de pendientes normalizadas; NDVI = índice de vegetación de diferencias normalizadas; SAVI = índice de vegetación ajustado al suelo (coeficiente de Pearson $\alpha = 0.05$).

CV = green coverage; CS = dry coverage; CVT = total vegetation coverage; PB = biomass production (Mg ha⁻¹); IVPN = vegetation index of normalized slopes; NDVI = normalized differences vegetation index; SAVI = vegetation index adjusted to the soil (Pearson coefficient $\alpha = 0.05$).

a un traslape del índice de área foliar (IAF) ya que los sensores remotos no lo cuantifican (Calera *et al.*, 2004). Medina *et al.* (2009), Meneses (2011) y Wylie *et al.* (1995) mencionan que los IV deben considerarse como una herramienta para la toma de decisiones en el manejo de pastizales, aun cuando las correlaciones entre PB y NDVI sean bajas ($r^2 = 0.66$ a 0.25). Para el IVPN durante su calibración se obtuvo $r^2 = 0.79$ en áreas de pastizal (Villa *et al.*, 2014)

Composición Florística

El muestreo de vegetación identificó 15 especies de gramíneas de 12 géneros y dos familias; 14 especies herbáceas de 14 géneros y siete familias. Las especies dominantes del estrato herbáceo son de las familias Poaceae, Asteraceae y Fabaceae que en conjunto representan 72.4% de las especies reconocidas. Además, se identificaron especies de las familias Cyperaceae, Convolvulaceae, Anthericaceae, Malvaceae y Scrophulariaceae.

Las gramíneas encontradas con mayor frecuencia en zanjas y bordos fueron *Melinis repens*, *Bouteloua hirsuta* y *Bouteloua erecta*. En los sitios de entre zanja y control, las especies más comunes encontradas fueron *Bouteloua griffithsii*, *Heteropogon contortus* y *Paspalum plicatulum*.

Una característica importante de las especies registradas en el muestreo es el potencial forrajero el pasto *Melinis repens* produce un forraje regular hasta antes de florecer, pero poco productivo¹, la especie *Heteropogon contortus* forrajero de regular a bueno cuando está tierno, pero cuando madura se vuelve maleza por su naturaleza áspera e inflorescencia repelente². El resto de las gramíneas tienen un potencial forrajero que varía de regular a excelente (Fernández *et al.*, 2013).

La especie que se presentó con mayor abundancia en zanjas y bordos fue *Melinis repens* (pasto rosado), catalogada como especie invasora con gran capacidad de adaptarse a condiciones adversas y áreas disturbadas (Melgoza *et al.*, 2014). Esto coincide con Cotler *et al.* (2015), quienes mencionaron que la construcción de estas obras provoca cambios en la composición florística por la remoción del suelo y nutrientes.

El agrupamiento de especies muestra semejanza entre sitios de muestreo con base en la presencia y ausencia. Con el 25% de la información se identificaron

seis grupos: el primero, conformado por seis sitios testigo (del 1 al 5 y el 13), cuatro sitios de zanja (1, 2, 5 y 7), cuatro sitios de entre zanja (3, 4, 5 y 6) y tres de bordo (1, 2 y 5). El segundo por un sitio entre zanja y uno de zanja, El tercer grupo por un sitio testigo, uno entre zanja, dos sitios de zanja y tres sitios de bordo. El cuarto grupo por un sitio testigo. El quinto grupo por ocho sitios testigo (del siete al 16), dos sitios de zanjas y uno de bordo y, por último, el grupo seis por un sitio entre zanja (Figura 2).

De estos grupos, se diferencian dos: el primero donde todos los sitios testigo excepto el 13 están ubicados cerca de los sitios con obras, que se atribuye mayor semejanza en la presencia de especies en áreas con obras. Por el contrario, en el grupo cinco, los sitios testigo a partir del 7 al 16, excepto el 12 y 13, que no se consideran en este grupo, se ubican a una distancia mayor de los sitios con obras y se presenta menor semejanza en su composición florística, con estos agrupamientos de semejanza, se observa por la distancia entre los sitios de muestreo debido a que los sitios testigo y con obras que se ubican cerca, se diferencian de los sitios testigo ubicados a mayor distancia, el agrupamiento no muestran una tendencia entre condiciones, es decir, que la agrupación sea entre sitios en pastizales con obras (zanjas, bordos, entre zanjas) o sin obras (Figura 2).

Con el procedimiento de permutación de respuesta múltiple (MRPP) se identificó que existen diferencias significativas en la composición florística del pastizal sin obras con los sitios de zanja - bordo; en los bordos ($T = -4.10$, $P > 95\%$) y con los sitios en las zanjas se identificaron diferencias significativas ($T = -3.04$, $P > 99\%$) (Cuadro 6).

La diferencia obtenida entre áreas testigo y áreas de zanja y bordo se atribuyen a la frecuencia de las especies registradas como es el caso de *Bouteloua erecta* y *Melinis repens*, que registraron alta frecuencia en parcelas con obras y baja frecuencia en parcelas testigo; o la presencia de especies como *Paspalum plicatulum*, *Heleocharis* sp., *Bothriochloa barbinodis* y *Grindelia subdecurrens* en parcelas sin obras, pero que no se desarrollan en los sitios de zanjas y casos contrarios donde especies que se desarrollaron en zanjas, no se desarrollaron en sitios testigo como *Cyperus esculentus*, *Macroptilium gibbosifolium* y *Castilleja tenuiflora*. La misma situación se presenta con las especies que se distribuyen en los bordos.

¹ <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/poaceae/rhynchelytrum-repens/fichas/ficha.htm>.

² <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/poaceae/heteropogon-contortus/fichas/ficha.htm>.

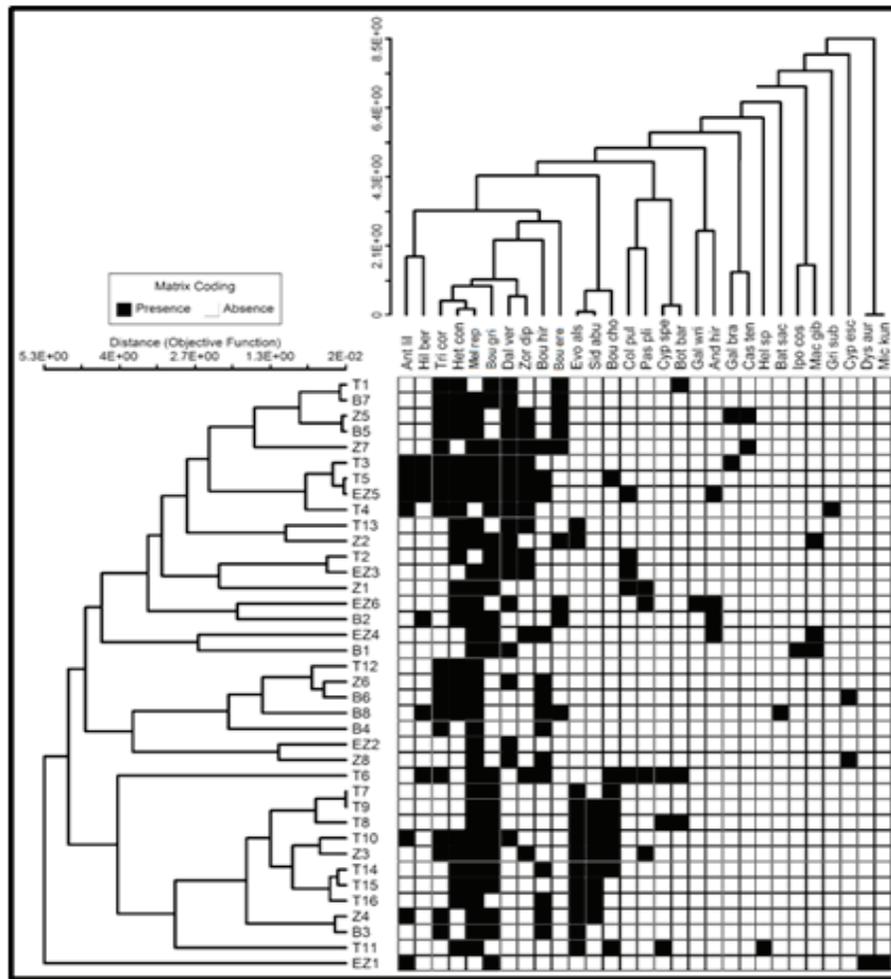


Figura 2. Agrupamiento de sitios de muestreo con base en presencia/ausencia de especies. † T1 a T16: 16 parcelas testigo; Z1 a Z8: ocho parcelas de muestreo en zanjas; B1 a B8: ocho parcelas de muestreo en bordo; EZ1 a EZ6: seis parcelas de muestreo en entre zanjas. Ant lil = *Anthericum liliago* L.; Hel sp = *Heleocharis* sp.; Cyp esc = *Cyperus esculentus* L.; Cyp spe = *Cyperus spectabilis* Link; Bou gri = *Bouteloua griffithsii* Columbus, Aliso; Bou ere = *Bouteloua erecta* (Vasey and Hack.) Columbus, Aliso; Bou hir = *Bouteloua hirsuta* Lag; Bou cho = *Bouteloua chondrosioides* (Kunth) Benth. ex S.Watson; Pas pli = *Paspalum plicatum* Michx.; Het con = *Heteropogon contortus* (L.) Roem. and Schult.; Mel rep = *Melinis repens* (Willd.) C.E.Hubb.; Bat sac = *Bathriochloa saccharoides* (Sw.) Rydb; Hil ber = *Hilaria belangeri* (Steud.) Nash; And hir = *Andropogon hirtiflorus* (Nees) Kunth.; Mic kun = *Microchloa kunthii* Desv.; Bot bar = *Bothriochloa barbinodis* (Lag.) Herter; Mac gib = *Macroptilium gibbosifolium* (Ortega) A. Delgado; Dal ver = *Dalea versicolor* Zuuc.; Zor dip = *Zornia diphylla* Pers; Sid abu = *Sida abutifolia* P. Miller; Cas ten = *Castilleja tenuiflora* Benth; Tri cor = *Tridax coronopifolia* (Kunth.) Hemsl.; Dys aur = *Dyssodia aurantiaca* B. L. Rob.; Gri sub = *Grindelia subdecurrens* DC; Evo als = *Evolvulus alsinoides* var. *angustifolius* (L.) Torr.; Ipo cos = *Ipomoea costellata* Torr.; Col pul = *Cologania pulchella* Kunth; Gal bra = *Galactia brachystachys* Benth.; Gal wri = *Galactia wrightii* A. Gray.

Figure 2. Grouping of sampling sites on the basis of presence/absence of species. † T1 to T16: 16 control plots; Z1 to Z8: eight sampling plots in ditches; B1 to B8: eight sampling plots in check dams; EZ1 to EZ6: six sampling plots in among-ditches. Ant lil = *Anthericum liliago* L.; Hel sp = *Heleocharis* sp.; Cyp esc = *Cyperus esculentus* L.; Cyp spe = *Cyperus spectabilis* Link; Bou gri = *Bouteloua griffithsii* Columbus, Aliso; Bou ere = *Bouteloua erecta* (Vasey and Hack.) Columbus, Aliso; Bou hir = *Bouteloua hirsuta* Lag; Bou cho = *Bouteloua chondrosioides* (Kunth) Benth. ex S.Watson; Pas pli = *Paspalum plicatum* Michx.; Het con = *Heteropogon contortus* (L.) Roem. and Schult.; Mel rep = *Melinis repens* (Willd.) C.E.Hubb.; Bat sac = *Bathriochloa saccharoides* (Sw.) Rydb; Hil ber = *Hilaria belangeri* (Steud.) Nash; And hir = *Andropogon hirtiflorus* (Nees) Kunth.; Mic kun = *Microchloa kunthii* Desv.; Bot bar = *Bothriochloa barbinodis* (Lag.) Herter; Mac gib = *Macroptilium gibbosifolium* (Ortega) A. Delgado; Dal ver = *Dalea versicolor* Zuuc.; Zor dip = *Zornia diphylla* Pers; Sid abu = *Sida abutifolia* P. Miller; Cas ten = *Castilleja tenuiflora* Benth; Tri cor = *Tridax coronopifolia* (Kunth.) Hemsl.; Dys aur = *Dyssodia aurantiaca* B. L. Rob.; Gri sub = *Grindelia subdecurrens* DC; Evo als = *Evolvulus alsinoides* var. *angustifolius* (L.) Torr.; Ipo cos = *Ipomoea costellata* Torr.; Col pul = *Cologania pulchella* Kunth; Gal bra = *Galactia brachystachys* Benth.; Gal wri = *Galactia wrightii* A. Gray.

Cuadro 6. Prueba de diferencia en la composición florística en pastizal con obras y sin obras.

Table 6. Statistical differences in the floristic composition of pastures with DCD and without DCD.

Condiciones comparadas	T	p
Testigo contra entre zanja	-1.16	0.12
Testigo contra zanja	-3.04	0.01
Testigo contra bordo	-4.10	0.00
Entre zanja contra zanja	-0.79	0.20
Entre zanja contra bordo	-1.71	0.06
Zanja contra bordo	1.16	0.89

CONCLUSIONES

- Las zanjas bordo, son prácticas útiles en el manejo de los escurrimientos superficiales y la recarga de acuíferos, los efectos sobre la cobertura vegetal y la producción de biomasa son evidentes solo en las zonas de acumulación de agua. En el sistema de zanjas-bordo, estas variables registraron los valores más altos en los sitios de zanja y bordo, lo que indica que las practicas afectan positivamente el desarrollo de la vegetación, a pesar de la presencia de zonas de disturbio.

- La eficiencia de la zanjas-bordo sobre la cobertura vegetal es más evidente en sitios con suelo someros, donde la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo es una limitante.

- Los porcentajes de cobertura vegetal, producción de biomasa e índices de vegetación de los sitios entre zanjas y parcelas control no reportaron diferencias significativas, lo cual se debe a que la entre zanja es la parte de menor influencia en la captación de agua de la zanja y bordo.

- Los índices de vegetación no son sensibles a las variaciones en la cobertura vegetal y producción de biomasa; las correlaciones con el porcentaje de cobertura verde son altas, con la producción de biomasa los coeficientes de determinación son bajos.

- Las zanjas bordos favorecen la captación de agua y pueden favorecer el desarrollo de la vegetación; sin embargo, inducen cambios en la composición florística, que se asocian a la presencia de especies con bajo potencial forrajero, pero que ayudan a fijar y proteger los bordos, tal es el caso del zacate rosado (*Melinis repens*).

LITERATURA CITADA

- Aguirre-Salgado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, M. de los Santos-Posadas y A. I. Aguirre-Salado. 2011. Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos SPOT 5 HRG: regresión y k-nn. *Agrociencia* 45: 105-119.
- Calera, A., J. González-Piqueras, and J. Meliá. 2004. Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *Int. J. Remote Sens.* 25: 97-109. doi: 10.1080/0143116031000115319.
- Contreras-Hinojosa, J. R., V. Volke-Haller, J. L. Oropeza-Mota, C. Rodríguez-Franco, T. Martínez-Saldaña y A. Martínez-Garza. 2003. Estado actual y causas de la degradación de los agostaderos en el municipio de Yanhuitlán, Oaxaca. *Terra Latinoamericana* 21: 427-435.
- Contreras-Hinojosa, J. R., V. Volke-Haller, J. L. Oropeza-Mota, C. Rodríguez-Franco, T. Martínez-Saldaña y Á. Martínez-Garza. 2005. Reducción del rendimiento de maíz por la erosión del suelo en Yanhuitlán, Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana* 23: 399-408.
- Cotler, H., E. Sotelo, J. Domínguez, M. Zorrilla, S. Cortina y L. Quiñones. 2007. La conservación de suelos: Un asunto de interés público. *Gaceta Ecol.* 83: 5-71.
- Cotler, H., S. Cram, S. Martínez-Trinidad, and E. Quintanar. 2013. Forest soil conservation in central Mexico: An interdisciplinary assessment. *Catena* 104: 280-287. doi: 10.1016/j.catena.2012.12.005.
- Cotler, H., S. Cram, S. Martínez T. y V. Bunge. 2015. Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera. *Investig. Geogr.* 88: 6-18. doi: 10.14350/rig.47378.
- Cruz-Cruz, E. and R. Aguirre. 1992. The common rangelands of Tiltepec, a typical case of environmental deterioration in northwest Oaxaca, Mexico. pp. 1-11. *In*: G. K. Perrier and C. W. Gay (eds.). *Current natural resources development activities in developing nation*. Department of Range Science. College of Natural Resources. Utah State University. Logan, UT, USA.
- Fernández-Reynoso, D. S., M. R. Martínez-Menes, A. Quero, E. Rubio-Granados y C. Palacios-Espinoza. 2013. Estrategias de manejo para la producción sustentable en laderas de la cuenca del Río Mixteco, Oaxaca. Technical Report. World Wildlife Fund-México. México, D. F.
- Higginbottom, T. P. and E. Symeonakis. 2014. Assessing land degradation and desertification using vegetation index data: Current frameworks and future directions. *Remote Sens.* 6: 9552-9575. doi: 10.3390/rs6109552.
- Huete, A. R. 1988. A Soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 25: 295-309. doi: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
- Huete, A. R. and R. D. Jackson. 1987. Suitability of spectral indices for evaluating vegetation characteristics on arid rangelands. *Remote Sens. Environ.* 23: 213-232. doi: 10.1016/0034-4257(87)90038-1.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2006. Conjunto de datos vectorial edafológico escala 1:250 000 serie II (continuo nacional). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México. <http://www.inegi.org.mx/>. (Consulta: septiembre 15, 2016).

- Magaña-Torres, O. S, y L. Diakite-Diakite. 2007. Evaluación externa de los apoyos de reforestación, obras y prácticas de conservación de suelos y sanidad forestal. Ejercicio Fiscal 2006. Universidad Autónoma de Chapingo y Grupo GSP. Texcoco, Estado de México, México.
- McCune, B. and M. J. Mefford. 2011. PC-ORD. Multivariate analysis of ecological data, v 6. MjM Software. Gleneden Beach, OR, USA.
- Medina -García, G., R. Gutiérrez-Luna, F. G. Echavarría-Chairez, M. D. Amador-Ramírez y J. A. Ruíz Corral. 2009. Estimación de la producción de forraje con imágenes de satélite en los pastizales de Zacatecas. *Téc. Pec. Méx.* 47:135–144.
- Melgoza-Castillo, A., M. I. Balandrán-Valladares, R. Mata-González y C. Pinedo-Álvarez. 2014. Biología del pasto rosado *Melinis repens* (Willd.) e implicaciones para su aprovechamiento o control. *Revisión. Rev. Mex. Cienc. Pec.* 5: 429-442.
- Meneses-Tovar, C. L. 2011. El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasylva* 238. 62: 39-46.
- Mielke, P. W., K. J. Berry, and G. W. Brier. 1981. Application of multi-response permutation procedures for examining seasonal changes in monthly mean sea-level pressure patterns. *Mont. Weather Rev.* 109: 120-126. doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0120:AOMRPP>2.0.CO;2.
- Olson, K. C. and R. C. Cochran. 1998. Radiometry for predicting tallgrass prairie biomass using regression and neural models. *J. Range Manage.* 51: 186-192. doi: 10.2307/4003206.
- Pérez-Calix, E. 2011. La flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fascículo 92. Instituto de Biología, UNAM-CONABIO. México, D. F. ISBN 968-36-3108-8 e ISBN 978-607-02-2563-5.
- Rodríguez, M. F., A. Florentino, J. Gallardo, and R. A. García. 2004. Sistemas de información geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en Badajoz - España aplicando la metodología USLE. *Agron. Trop.* 54: 391-409.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, and J. C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. MASA/GSFC. Type III. Final Report, Greenbelt, MD, USA.
- Rzedowski, G. C. de, J. Rzedowski. 2005. Flora fanerogámica del Valle de México. Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán, México. ISBN de edición digital 978-607-7607-36-6.
- SEMARNAT-CP (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados). 2003. Evaluación de la Degradación del Suelo causada por el Hombre en la República Mexicana, escala 1:250,000. Memoria Nacional 2001-2002. México, D. F.
- Singh, G., G. R. Choadhary, B. Ram, and N. Kumar Limba. 2011. Effects of rainwater harvesting on herbage diversity and productivity in degraded Aravalli hills in western India. *J. For. Res.* 22: 329-340. doi: 10.1007/s11676-011-0177-5.
- Singh, G., A. U. Khan, A. Kumar, N. Bala, and U. Kumar Tomar. 2012. Effects of rainwater harvesting and afforestation on soil properties and growth of *Emblica officinalis* while restoring degraded hills in western India. *Afr. J. Environ. Sci. Technol.* 6: 300-311. doi: 10.5897/AJEST11.040.
- Singh, G., D. Mishra, K. Singh, and R. Parmar. 2013. Effects of rainwater harvesting on plant growth, soil water dynamics and herbaceous biomass during rehabilitation of degraded hills in Rajasthan, India. *For. Ecol. Manage.* 310: 612-622. doi: 10.1016/j.foreco.2013.09.002.
- Thomson, E. F., S. N. Mirza, and J. Afzal. 1998. Technical Note: Predicting the components of aerial biomass of four-wing saltbush from shrub height and volume. *J. Range Manage.* 51: 323-325. doi: 10.2307/4003418.
- Torres-Rojo, J. M., O. S. Magaña-Torres, J. D. Fernández-Medina, E. E. Gómez-Morán, V. E. Sosa-Cedillo, L. A. Alonso Torres y A. Bello Lara. 2010. Informe de evaluación externa de los apoyos de restauración de suelos forestales. Ejercicio fiscal 2009. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Edo. de México, México.
- Villa-Herrera, A., F. Paz-Pellat, M. J. Pérez-Hernández, C. Rojas-Montes, M. Rodríguez Arvizu, S. Ortiz-Acosta, M. Casiano-Domínguez, and H. Díaz-Solís. 2014. Animal carrying capacity estimation in rangelands using a normalized slopes vegetation index. *Agrociencia* 48: 599-614.
- Wylie, B. K., I. Denda, R. D. Pieper, J. A. Harrington, B. C. Reed, and G. M. Southward. 1995. Satellite-based herbaceous biomass estimates in the pastoral zone of Niger. *J. Range Manage.* 48: 159-164. doi: 10.2307/4002804.
- Zhang, F., Z. Xing, H. W. Rees, Y. Dong, S. Li, and F. Meng. 2014. Assessment of effects of two runoff control-engineering practices on soil water and plant growth for afforestation in a semi-arid area after 10 years. *Ecol. Eng.* 64: 430-442. doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.12.024.
- Zhou, J., B. Fu, G. Gao, Y. Lü, Y. Liu, N. Lü, and S. Wang. 2016. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China. *Catena* 137: 1-11. doi: 10.1016/j.catena.2015.08.015.