

Desempeño de un subsolador integral biomimético para laboreo sustentable de suelos agrícolas

Performance of a biomimetic integral subsoiler for sustainable tillage of agricultural soils

Esteban Salvador Osuna-Ceja¹, Francisco Garibaldi Márquez^{1*}, Raúl Vidal García Hernández¹

¹Campo Experimental Pabellón, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). km. 32.5 carretera Aguascalientes-Zacatecas. Apartado Postal 20. CP. 20660, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. Correo electrónico: garibaldi.francisco@inifap.gob.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño de un subsolador integral biomimético (SIB) para el laboreo sustentable del suelo, comparado con un multiarado (M), un equipo subsolador (S) y el sistema convencional de arado (AD) y rastra de discos (Ra). El trabajo se estableció en un suelo franco arenoso, en franjas de 15 m de ancho por 110 m de longitud, sin repeticiones. Se encontró que SIB y M tienen mayor anchura de trabajo, demandan más fuerza de tiro y menor consumo de combustible por hectárea (ha), por lo que estadísticamente son diferentes a AD y S. La velocidad de trabajo de SIB repercute directamente en su rendimiento operativo (ha h^{-1}), ya que es 33.8% mayor al rendimiento de AD. En calidad y operación de los implementos, estos no produjeron cambios temporales sobre la densidad aparente (D_a), diámetro medio de los agregados (DG_{50}), resistencia a la penetración (R_p) y humedad gravimétrica (Θ_g); estadísticamente no mostraron diferencias ($p \leq 0.05$), aunque en promedio D_a en M fue mayor que en AD, S y SIB para todas las profundidades de muestreo. Por tanto, se concluye que SIB representa una alternativa sustentable para la preparación primaria del suelo y puede utilizarse en lugar de la labranza convencional.

Palabras clave: Labranza; subsolador integral biomimético; combustible; rendimiento operativo.

Abstract

The goal of this study was to evaluate the performance of a biomimetic integral subsoiler (SIB) for the sustainable tillage of soil compared to a multiplough (M), a subsoiler equipment (S) and the conventional tillage which is relied on disc plough (AD) and disk harrow (Ra). The experiment was established on a sandy loam soil in strips of 15 m width and 110 m long, without replications. It was found that SIB and M have a more working width, demand bigger pull force and less fuel consumption per hectare (ha) than AD and S; therefore, SIB and M are statistically different than AD and S. The working speed of SIB has direct repercussions on its operating performance (ha h^{-1}); it was 33.8% higher than the performance of AD. About the quality and operation of the equipment, these did not produce temporary changes on the soil bulk density (D_a), mean diameter of the aggregates (DG_{50}), resistance to penetration (R_p) and gravimetric humidity (Θ_g); hence, these did not show statistical differences ($p \leq 0.05$) although, in average, D_a in M was bigger than in AD, S, and SIB for all the sampled depths. Therefore, it is concluded that SIB represents a sustainable choice to primary tillage of soils and can be used instead of conventional tillage.

Keywords: Tillage; biomimetic integral subsoiler; fuel; operating performance.

Recibido: 12 de junio de 2017

Aceptado: 25 de septiembre de 2018

Publicado: 15 de agosto de 2019

Como citar: Osuna-Ceja, E. S., Garibaldi-Márquez, F., & García-Hernández, R. V. (2019). Desempeño de un subsolador integral biomimético para laboreo sustentable de suelos agrícolas. *Acta Universitaria* 29, e1968. doi. <http://doi.org/10.15174/au.2019.1968>

Introducción

En la región templada semiárida del Centro-Norte de México, donde llueven entre 250 mm y 500 mm en un período de 70 a 100 días al año, y la temperatura media es de 15 °C a 20 °C, se siembra bajo agricultura de temporal 2.5 millones de hectáreas (ha), pese a esta deficiencia. El frijol se siembra en 1.2 millones ha, el maíz en 965 098 ha y la avena forrajera en 443 446 ha. El rendimiento promedio de frijol es de 0.59 t ha⁻¹, el maíz grano 1.0 t ha⁻¹ y la avena forrajera 10.2 t ha⁻¹ de biomasa verde (Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2015). En Aguascalientes, enclavado en esta región, se siembra una superficie de 100 000 ha con maíz, frijol y cereales de temporal, con un rendimiento medio estatal de 0.39 t ha⁻¹, 0.75 t ha⁻¹ y 8.0 t ha⁻¹ de grano y forraje verde, respectivamente (SIAP, 2015).

Además de bajos rendimientos por la escasa disponibilidad de agua, los agricultores de las zonas semiáridas enfrentan problemas de altos costos del sistema de producción, especialmente con relación a las labores de preparación de suelos. Como evidencia de lo anterior, se reporta que la labranza tradicional que realiza el agricultor de esta zona consiste en un paso de arado de discos y uno de rastra (AD+Ra); práctica que tiene la finalidad de hacer una reducción de los agregados, cambiando las condiciones físicas y mecánicas del suelo que varían dinámicamente con el tiempo, el manejo y las condiciones ambientales (Osuna, 1996; Osuna *et al.*, 2006). Por tanto, esta práctica es de gran importancia en el proceso productivo, pero es demandante de gran cantidad de energía y, por ende, costosa, tanto económica como ecológicamente (Adewoyin & Ajav, 2013; Cadena-Zapata & Gaytán-Muñiz, 2004; Lobb, Huffman & Reicosky, 2007).

Una alternativa de laboreo de suelos para reducir la energía y los costos de producción en los cultivos de temporal del semiárido es la labranza de conservación, la cual permite captar y almacenar humedad en el perfil del suelo, tal como ocurre con la labranza vertical (Arellano-Arciniegas, Osuna-Ceja, Martínez-Garmiño & Reyes-Muro, 2015; Osuna-Ceja, Arias-Chávez, Núñez-Hernández & González Castañeda, 2015).

Para captar humedad en un sistema de labranza vertical, se utilizan los arados de cincel, también llamados subsoladores, cuyo diseño permite penetrar suelos firmes y romper capas compactas. Con este sistema, la superficie de suelo roturada permite atrapar y mantener el agua de la lluvia, además de resistir la erosión del viento. Sin embargo, los equipos empleados en los sistemas de labranza vertical operan horizontal y verticalmente, por lo que demandan gran cantidad de fuerza al tractor por sus profundidades de trabajo y forma de interactuar con el suelo, parámetro que tiene relación directa con el gasto energético (Cadena-Zapata & Gaytán-Muñiz, 2004; Garibaldi, García & Osuna, 2016). La experiencia ha demostrado que la tracción mínima de los cuerpos subsoladores ocurre cuando el ángulo de elevación es de 20° entre la superficie de la herramienta y la horizontal. El desmenuzamiento ocurre con el menor esfuerzo cuando la herramienta está aplicando fuerza de elevación que cuando se corta horizontalmente o empuja verticalmente contra el suelo (Buckingham, 1976; Ventura, Norton, Ward, López-Bautista & Tapia-Naranjo, 2003).

Por tal motivo, en este campo de la mecanización agrícola se han estudiado nuevas geometrías de estas herramientas, cuyos resultados de varias investigaciones muestran que las geometrías curvas demandan entre 7% a 20% menos fuerza a la barra de tiro del tractor, comparadas con geometrías en forma de L (Aday, Haliphy & Majeed, 2004; Smith & Williford, 1988). Sin embargo, se ha reportado que las puntas para estas herramientas tienen relación directa con la demanda de fuerza de tiro en los tractores. A pesar de que la mayor perturbación del suelo se presenta con cuerpos subsoladores con puntas aladas, lo que es mejor para el cultivo, estas demandan en promedio 30% más de fuerza para su operación (Godwid, 2007; Romantchik, Sandoval, Chávez, Gaytán & Mayans, 2009).

En años recientes, con el fin de reducir la potencia de tiro de los implementos para labranza vertical, los diseños de estas herramientas están siendo basados en la biomimética, es decir, imitaciones a la

naturaleza. En la última década, se han publicado trabajos que analizan características de organismos terrestres y su posible aplicación al diseño de implementos de labranza más eficientes (Bar-Cohen, 2005; 2006; Chirende & Li, 2009; Ren, Tong & Chen, 2001; Rocha, Rodríguez, Martínez & López, 2012). Tong, Sun, Chen & Zhang (2005) reportaron posibles aplicaciones antiadherentes de la cutícula del escarabajo *Copris ochus* Motschulsky en subsoladores agrícolas, mientras que Zhang, Tong & Ma (2014) reportaron el mismo efecto basados en las superficies de las garras del ratón de casa *Mus musculus*. Por otro lado, Guo, Zhou, Zhang & Li (2009) encontraron ahorros de potencia de tiro y energía al diseñar cuerpos subsoladores basados en las garras del ratón de campo *Citellus dauricus*.

Otro aspecto directamente correlacionado con el gasto energético en preparar el suelo para la siembra son las labores individuales, tal como ocurre al trabajar los arados de discos, rastra de discos (Ra), subsoladores (S), cinceles, vibrocultivadores, entre otros. Sin embargo, sustentado en la ingeniería de diseño y la biomimética para imitar los procesos naturales, se ha originado una fuerte corriente que busca generar maquinaria e implementos agrícolas para usos múltiples, eficientes, cómodos y ahorradores de energía. De tal manera que se ha buscado combinar e integrar en un solo implemento a más de un dispositivo, basados en los principios de labranza vertical, respetando la conformación natural de los horizontes, mejorar la calidad del suelo y retención del agua pero que, a su vez, contribuyan a la reducción de los costos de producción (Upadhyaya, Lancas, Santo & Raghuwanshi, 2001).

En México existe poca información sobre la combinación de implementos, a pesar de que en la actualidad se requiere maquinaria especial conformada por varios componentes. Por ejemplo, Hernández, Osuna, Reyes, Martínez (2013) y Rojas, Ozuna & Zitz (2013) combinaron sistemas de captación de agua de lluvia *in situ* en una sembradora, y Garibaldi *et al.* (2016) desarrollaron un implemento integral que rompe el suelo verticalmente, aporta materia orgánica y prepara la superficie del suelo en un solo paso de tractor. Al respecto, Ventura *et al.* (2003) desarrollaron un sistema de labranza que incluye la combinación de un arado de subsuelo y un rodillo formado con ruedas dentadas para mejorar la estructura del suelo y la cosecha de agua de lluvia *in situ*. Los autores observaron que tanto la tasa de escurrimiento como la de erosión del suelo fueron mayores en el sistema tradicional, en comparación con el prototipo mencionado.

En el contexto del laboreo no sustentable de los suelos del semiárido, surge la necesidad de aprovechar las oportunidades tecnológicas que pueden contribuir a la solución de los problemas ambientales asociados a esta práctica para la producción de cultivos en la región Centro-Norte de México. El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño de un subsolador integral biomimético (SIB) para el laboreo sustentable del suelo, comparado con implementos de labranza reducida y el sistema convencional de arado (AD) y Ra.

La hipótesis establecida fue que los resultados tecnológicos de los implementos de labranza vertical de opción múltiple son similares e incluso mejores que los implementos convencionales, y demandan menor consumo de combustible para su operación.

Materiales y Métodos

El presente estudio se llevó a cabo en el Campo Experimental Pabellón, Aguascalientes, México, localizado a los 22°11' N y 102°20' O, a 1912 m s.n.m., y consistió en evaluar los cuatro tratamientos de labranza siguientes: AD+Ra, multiarado-rastra (M+Ra), subsolador-rastra (S+Ra) y SIB. Para ello se seleccionó una superficie de terreno de 1 ha, donde se establecieron dichos tratamientos. La unidad experimental consistió en una franja de 15 m de ancho y 110 m de longitud, considerando 100 m como distancia real de trabajo y cinco metros de cabecera para virajes. Después del trabajo de los implementos de labranza primaria, se realizó un paso de rastra en cada tratamiento, a excepción de SIB.

Características generales del equipo agrícola

El equipo que se empleó en este trabajo fue un Tractor New Holland 5610 2WD, con 59.68 kW de potencia al volante del motor (80 hp); un tractor John Deere 5415 4WD, con 57.44 kW de potencia al volante del motor (77 hp); un arado John Deere con tres discos; una rastra John Deere de 18 discos; equipo S con dos cuerpos; un multiarado (M) con dos cuerpos y un SIB. Este último consta de tres componentes: 1) tres timones curvos, cuya geometría simula la garra de la ardilla moteada (*Xerospermophilus spilosoma*), que rompen las capas compactas de piso de arado sin invertir el suelo; 2) rotocultivador que muelle la capa superficial del suelo; y 3) contenedor y dosificador de abono orgánico, el cual es incorporado al suelo por medio del rotocultivador; todo se realiza en una sola operación (Garibaldi *et al.*, 2016).

Caracterización del sitio de evaluación

Antes de establecer los tratamientos, se realizó una caracterización del suelo a través de las siguientes mediciones: porcentaje de las fracciones minerales (arcilla, limo y arena) que determinaron la textura, diámetro medio de agregados (DG_{50}) (mm), humedad gravimétrica (θ_g) (%), densidad aparente (D_a) ($Mg\ m^{-3}$), cobertura vegetal ($t\ ha^{-1}$) y resistencia a la penetración (R_p) (MPa). Para ello, se realizó un muestreo sistemático donde se tomaron 25 muestras de suelo en la capa arable de 0 cm - 30 cm, de las cuales se obtuvo una muestra representativa y se envió al laboratorio para determinar la textura mediante los procedimientos analíticos de rutina de la norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2002). La D_a del suelo se determinó en los estratos de 0 cm -10 cm, 10 cm - 20 cm y 20 cm - 30 cm de profundidad, mediante el método de la barrena de doble cilindro (Jury *et al.*, 1991). Esta se realizó en los 25 puntos donde se tomaron las muestras para el análisis fisicoquímico de suelo. La cobertura vegetal se obtuvo tomando cinco muestras en las diagonales principales del terreno de evaluación. Para ello se cortó la maleza comprendida dentro del área de muestreo desde la base y se registró su peso. La R_p del suelo se determinó mediante el penetrómetro de impacto (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo [CIMMYT], 2013) en los 25 puntos seleccionados, y en cada punto se tomaron los datos en las profundidades: 10 cm, 20 cm y 30 cm. Para esta variable (R_p) se cuantificó el número de impactos que se requirieron para alcanzar cada una de las profundidades señaladas; posteriormente, se utilizó la fórmula 1:

$$R_p = \frac{(N \times M \times g \times SD)}{(A \times PD)} \quad (1)$$

donde:

R_p = resistencia a la penetración (Pa),

N = número de impactos,

M = peso de la masa (kg),

g = la gravedad ($9.81\ m\ s^{-2}$),

SD = distancia que se desliza (m),

A = área de la superficie del cono (m^2),

El área de la superficie del cono se calcula con la siguiente fórmula:

$$A = \pi \times r \times s \quad (2)$$

donde:

A = el área de la superficie del cono (m²),

r = el radio del cono (m),

s = el largo del cono (m).

Desempeño de la configuración del tractor-implemento

Los implementos se operaron con el tractor NH 5610, el cual está provisto de ocho marchas (V₁, V₂, V₃, V₄, V₅, V₆, V₇ y V₈), de las cuales las cuatro primeras corresponden a marchas bajas. Primero, se determinó el número de marcha correcta para la operación de los implementos, considerando el patinaje (%) que presentaron los neumáticos motrices (fórmula 3) y la sobrecarga del motor.

$$\delta = \left(1 - \frac{l_i}{l_o}\right) * 100 \quad (3)$$

donde δ es patinaje (%); l_i la distancia que recorre el tractor en 10 revoluciones de la rueda motriz con el implemento operando, y revoluciones del motor en régimen nominal; y l_o la distancia que recorre el tractor en 10 revoluciones de la rueda motriz sin carga sobre superficie dura y marcha V₁ y desacelerado.

Después, para determinar el comportamiento del tractor-implemento para labranza primaria se registró: ancho de trabajo (m), profundidad de trabajo (m), velocidad de trabajo (km h⁻¹), fuerza de tiro (kN), potencia de tiro (kW), y el consumo de combustible (L ha⁻¹) se determinó para los tratamientos de labranza primaria y secundaria. Las evaluaciones se realizaron de acuerdo con las normas mexicanas MNX-O182-SCFI-2003 (DOF, 2003a) y NMX-0183-SCFI-2003 (DOF, 2003b). Con los valores promedio de ancho y velocidad de trabajo se determinó el rendimiento operativo de los implementos. El consumo de combustible se determinó por el método del tanque lleno en trabajo operativo tractor-implemento, es decir, considerando la distancia real de trabajo y los virajes. La fuerza de tiro demandada por los equipos se determinó con una celda de carga marca *Novatech*, modelo F204. Para la lectura de datos se utilizó un circuito con base en ARDUINO 1 y se almacenaron en una memoria SD. Previamente a su uso, la celda se calibró agregando gradualmente pesos conocidos y se registraron los voltajes de salida, para lo cual se obtuvo la siguiente ecuación de ajuste: $F_t = 418.92 \times -133.16$. Los implementos se engancharon al tractor NH 5610 que fungió como tractor freno. De la barra de tiro de este se amarró una cadena y en uno de sus extremos se colocó la celda de carga; del mismo modo, se amarró una cadena de la celda de carga al tractor John Deere 5415 que fungió como tractor motriz. El tractor freno se trabajó en ralenti, posición neutra en la caja de cambios e implementó en operación. El tractor motriz se trabajó en el número de marcha más baja, acelerado lo necesario para arrastrar al tractor freno a velocidad constante. Después, se hicieron repeticiones con el implemento suspendido. La fuerza de tiro se obtuvo por diferencia de lecturas con y sin carga.

Calidad de trabajo de los implementos

Para evaluar la calidad de los resultados después de las labores se analizaron las siguientes variables: D_a (Mg m⁻³), DG_{50} (mm), índice de rugosidad (R0) (cm) y θ_g (%). La información de las propiedades del suelo cuantificadas en cada tratamiento de labranza se analizó con base en un diseño completamente al azar con cinco repeticiones. La distribución del tamaño de los agregados se determinó en muestras de suelo de aproximadamente 1.5 kg (peso seco), tomadas en cinco puntos por tratamiento en los estratos de 0 cm - 10 cm,

10 cm - 20 cm y 20 cm - 30 cm de profundidad. En seguida, se tamizaron con malla de 8 mm. Después, el material se secó colocándolo por el término de 72 horas en una cámara con circulación de aire forzado, donde la temperatura osciló entre 22 °C y 25 °C. Las muestras secas se fraccionaron utilizando un juego de seis tamices (6.43 mm, 6.3 mm, 4.75 mm, 2.38 mm, 2.0 mm y 0.25 mm) y agitador excéntrico (Test Sieve Shaker, Endecott). El tiempo de agitación fue de 15 minutos por muestra. Posteriormente, se calculó el DG_{50} según la metodología descrita por Cabria, Calandroni & Monterrubianesi (2002). Las fórmulas 4 y 5 de cálculo utilizadas fueron:

$$DG_{50} = \exp \alpha \quad (4)$$

$$\alpha = 0.01 \sum_{i=1}^n P_i \ln M_i \quad (5)$$

donde:

DG_{50} = diámetro geométrico promedio de los agregados,

i = iésima clase de tamaño de agregados,

n = número total de clases de tamaños de agregados,

P_i = proporción en peso de la iésima clase de tamaño de agregado,

\ln = logaritmo natural,

M_i = media aritmética de la iésima clase de tamaño de agregado.

En este trabajo se consideró al DG_{50} un indicador del nivel de agregación del suelo antes y después del laboreo.

El R_0 superficial del suelo permitió conocer las diferencias del microrrelieve después del trabajo de los implementos evaluados. Esta fue medida dentro del área efectiva que cubrió uniformemente cada tratamiento de labranza (1500 m²). Para ello, se ubicaron al azar tres áreas de muestreo por tratamiento. Después, se midió el R_0 aleatoria con un perfilómetro que registró los desniveles de 100 puntos por metro cuadrado (Garibaldi *et al.*, 2016), sobre una superficie de 1.5 m x 1.7 m por área ubicada. El valor del R_0 aleatoria se calculó mediante la relación de alturas sobre un transecto de 1.50 m cada 10 cm y se expresa estadísticamente en términos de desviación estándar.

Para el análisis de datos se usó el paquete *Statistical Analysis Systems*, versión 8 (SAS, 2009), con el cual todas las evaluaciones fueron analizadas mediante la aplicación de Análisis de Varianza (Andeva). Cuando se detectó significancia entre tratamientos de labranza, se aplicó la prueba DMS al 0.05.

Resultados y Discusión

Caracterización física inicial del suelo

Los resultados de algunas propiedades físicas y mecánicas de la caracterización inicial del terreno se muestran en la tabla 1. Cabe mencionar que el suelo se clasificó como franco arenoso en la capa arable, por tener 18.76% de arcilla, 26.00% de limo y 55.24% de arena; su humedad inicial fue 14.5% y su densidad aparente en el perfil 0 cm - 30 cm de profundidad fue de 1.38 Mg m⁻³, cuyo valor está por debajo del límite

crítico de compactación establecido por Narro (1994) para esta clase textural. En cuanto a la cobertura basal del suelo, el día de la evaluación, la vegetación viva cubría aproximadamente 80% del total de la superficie, y se obtuvo un peso de 3.5 T ha⁻¹ de cobertura verde.

Tabla 1. Variables estadísticas de propiedades físicas y mecánicas iniciales del suelo en el área experimental.

Propiedad física	Mínimo	Máximo	Media [†]	Desviación Estándar
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	1.23	1.66	1.38	0.120
Diámetro medio de agregados (mm)	1.33	6.14	3.27	1.38
Resistencia a la penetración (MPa)	0.39	5.25	2.08	0.65
Humedad del suelo (%)	9.11	18.96	14.5	2.73

[†] El tamaño de muestra fue de 25
Fuente: Elaboración propia.

Desempeño de los implementos

Todos los implementos para labranza primaria se operaron en régimen nominal del motor (1900 rpm) en el número de marcha siguiente: AD se trabajó en V₃ y presentó un patinaje de 7.71%, SIB en V₂ con 10.78% de patinaje, M en V₂ con 13.25% de patinaje y, finalmente, S en V₃ con patinaje de 12.93%. Con base en el rango óptimo de patinaje, que va de 15% a 20% para tractores con dos ruedas motrices en suelo labrado (Gaytán, Muñoz, Chávez & Capulín, 2005), se observa que todos los implementos están fuera del rango para que el tractor libere su máxima eficiencia de fuerza a la barra de tiro. Cabe resaltar que el seleccionar la marcha correcta de la caja de cambios del tractor para la operación de los implementos puede mejorar la eficiencia del desempeño de este mismo en la entrega de fuerza a la barra de tiro, velocidad de trabajo, patinaje y consumo de combustible (Richler, Fulron, Raper, McDonald & Zech, 2011).

En la tabla 2 se presentan los valores de las variables que evalúan el desempeño tractor-implemento después de las labores. Los análisis de varianza de las variables mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para la mayoría de ellas.

Tabla 2. Variables de desempeño de la configuración tractor-implemento.

Implemento	Ancho de trabajo (m)	Prof. de trabajo (m)	Velocidad de trabajo (km h ⁻¹)	Rendimiento operativo (ha h ⁻¹)	Fuerza de tiro (kN)	Potencia de tiro (kW)	Consumo de Combustible (L ha ⁻¹)
AD*	0.774 c	0.222	4.380 b	0.281 c	11.77 b	14.33 a	20.84
M*	1.759 b	0.211	2.664 c	0.407 a	12.76 ab	9.44 b	15.12
S*	0.757 c	0.292	5.316 a	0.164 d	10.04 c	14.33 a	23.57
SIB	1.834 a	0.284	2.388 d	0.376 b	12.96 a	8.89 b	16.64
Media	1.281	0.252	3.687	0.307	11.88	11.74	18.93
DMS05	0.028	ns	0.146	0.007	1.144	1.440	-

SIB- Subsolador integral biomimético; AD- Arado de discos; M- Multiarado y S- Subsolador; valores con la misma letra presentaron el mismo comportamiento estadístico ($p \leq 0.05$). *Consumo de combustible con un paso de rastra (Ra).
Fuente: Elaboración propia.

El ancho de trabajo es imprescindible para la medición de la capacidad de trabajo e influye en el criterio de selección del equipo por parte de los productores. Los resultados muestran que existen diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos con relación a lo ancho de trabajo, de los cuales el mejor fue SIB, seguido de M, luego AD y por último S. Probablemente esta diferencia radica en el diseño de los implementos, el cual considera la potencia que demandarían para romper el suelo. No hubo diferencia significativa ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos respecto a la profundidad de trabajo de los implementos, aunque en promedio S

y SIB son los que tuvieron mayor penetración relativa, lo que puede atribuirse al tipo de punta de los cuerpos subsoladores, la cual fue de tipo formón, pero aún se vio limitada por los procesos naturales de consolidación del suelo. La penetración depende de la resistencia que presenta el suelo que, a medida que se consolida por los fenómenos de humedecimiento y secado, reduce la profundidad de trabajo de los implementos, como lo han reportado otros investigadores en trabajos similares (Cadena, 1999; Cadena-Zapata & Gaytán-Muñiz, 2004).

En relación con la velocidad de trabajo de los implementos para labranza primaria, existieron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos. El implemento que operó a mayor velocidad fue S, después AD, en seguida M y finalmente SIB. La velocidad de trabajo y el ancho de trabajo tienen relación directa con el rendimiento operativo, la cual es una variable que repercute en la toma de decisiones para adquirir un implemento y en la administración de ellos. Al respecto, se observa que M tiene mayor rendimiento operativo, seguido del SIB, lo que representa un 44.8% y 33.8% mayor rendimiento que AD, respectivamente. En contraste, el menor rendimiento lo presentó S debido a su doble paso sobre el terreno, el cual fue inferior respecto a AD en 41.7%.

La fuerza de tiro que demandan los implementos está en función de factores como el ancho de trabajo, profundidad de trabajo, velocidad de trabajo, condiciones del suelo, geometría y ángulo de ataque del componente que interactúa con el suelo y, además, el tipo de punta en subsoladores agrícolas (Aday, Abdulnabi & Ndawii, 2011; Godwid, 2007; Godwin, Spoor, & Soomro, 1984; McKyes, 1985; Mouazen & Ramón, 2002; Romantchik *et al.*, 2009; Wheeler & Godwin, 1996). En este estudio se aprecia que SIB y M fueron los implementos que demandaron mayor fuerza para su operación, lo que se puede atribuir al ancho de trabajo de ellos mismos, por lo que estadísticamente son diferentes ($p \leq 0.05$) a los tratamientos AD y S. En el caso particular de M y S, estos son implementos con dos cuerpos subsoladores de geometrías parecidas, la única diferencia radicó en su tipo de punta; M contó con puntas aladas en V y S con puntas tipo formón; la diferencia de fuerza entre ambos equipos fue de 27%, lo que se asemeja con lo reportado por otros autores (Romantchik *et al.*, 2009; Spoor & Godwin, 1978).

Así mismo, el efecto de la fuerza y la velocidad de trabajo se vio reflejado en el desarrollo de potencia a la barra de tiro. En este caso, la mayor potencia se desarrolló en AD y S, después en M y finalmente en SIB. Es decir, considerando los 59.68 kW del motor del tractor, el 24% se transmitió a la barra de tiro para la operación de AD y S, y 15.81% y 14.89% en M y SIB, respectivamente. La baja eficiencia de la potencia del motor entregada a la barra de tiro se atribuye a la eficiencia de la transmisión del tractor, el patinaje, la resistencia a la rodadura, entre otros factores.

El tratamiento que consumió mayor combustible fue S+Ra, con 13.7% con respecto a AD+Ra. Esto se debió al doble paso del subsolador sobre el terreno. Los tratamientos M+Ra y SIB fueron los que consumieron menor combustible (con 27.4% y 20.2%, respectivamente), de acuerdo con AD+ Ra. Cabe resaltar que en el tratamiento SIB no fue necesario dar el paso de rastra, debido a que es un implemento que tiene integrado un rotocultivador. Comparado con los otros tratamientos, los cuales, a pesar de que recibieron un paso de rastra, no dejaron el suelo en condiciones aptas para siembra, lo cual demanda un segundo paso de rastra que incrementaría el consumo de combustible.

Calidad de trabajo de los implementos

El objetivo más importante de las labores primarias es el arreglo de agregados y poros, que en su contexto general se conocen como estructura del suelo. En la tabla 3 se observan los cambios de las propiedades físicas y mecánicas determinadas para evaluar los aspectos primarios de la labranza, como son el momento y la intensidad que influyen en la estructura del suelo en cada tratamiento. El momento del laboreo es

importante en relación con el contenido de agua del suelo y la intensidad de laboreo afecta muchos aspectos de la condición del suelo, entre otros; tiende a la deformación del arreglo de poros del suelo y, en consecuencia, eleva la densidad aparente y disminuye su estabilidad estructural (Ceballos, Hernández & Vélez, 2010).

Los análisis de varianza de las variables físicas determinadas no mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre tratamientos de labranza para las profundidades muestreadas, aunque en promedio se observa un aumento mayor de la densidad aparente (D_a) en el tratamiento M para todas las profundidades de muestreo, comparado con los demás tratamientos de labranza empleados (tabla 3). Sin embargo, para la profundidad 20 cm - 30 cm se observó un incremento de dicha variable en todos los tratamientos, registrándose los valores más bajos en AD y los cambios más drásticos en M. En general, los valores de D_a están por debajo de la densidad máxima de suelos arenosos compactados de 1.8 Mg m^{-3} descrita por Narro (1994), lo cual es un indicativo de que no hay compactación en el suelo donde se aplicaron los diferentes sistemas de labranza.

Tabla 3. Valores promedio de las propiedades físicas y mecánicas del suelo después del laboreo con los diferentes tratamientos de labranza.

Tratamiento	D_a (Mg m^{-3})	DG_{50} (mm)	R_p (MPa)	θ_g (%)
0 cm - 10 cm				
AD + Ra	1.28	4.533	0.390	11.41
M + Ra	1.49	1.767	0.347	11.80
S + Ra	1.30	2.990	0.260	10.70
SIB	1.22	3.533	0.390	9.61
Media	1.32	3.205	0.347	10.88
DMS05	ns	ns	ns	ns
10 cm - 20 cm				
AD + Ra	1.27	2.863	1.573	12.13 a
M + Ra	1.50	4.420	1.223	13.04 a
S + Ra	1.32	2.823	1.443	12.54 a
SIB	1.34	3.063	2.100	10.38 b
Media	1.36	3.930	1.585	12.02
DMS05	ns	Ns	ns	1.656
20 cm - 30 cm				
AD + Ra	1.31	3.220	2.843	11.82
M + Ra	1.49	3.470	1.880	14.00
S + Ra	1.42	2.137	2.537	12.36
SIB	1.42	4.740	3.540	10.51
Media	1.41	3.392	2.700	12.17
DMS05	ns	ns	ns	ns

Da -Densidad aparente, DG_{50} -diámetro geométrico de los agregados, R_p - resistencia a la penetración, θ_g -humedad gravimétrica, AD - Arado de discos, Ra- Rastra, M - Multiarado, S - Subsolador y SIB - Subsolador integral biomimético
Fuente: Elaboración propia.

En relación con el tamaño DG_{50} , este no mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre tratamientos para ninguna de las profundidades de muestreo, aunque en promedio en los primeros 10 cm de profundidad los valores más altos correspondieron a AD (tabla 3). Generalmente, el valor medio de DG_{50} fue más alto en todos los tratamientos de labranza para las profundidades 10 cm - 20 cm y 20 cm - 30 cm, siendo menor en

S, producto quizás de la acción de roturación del doble paso con el subsolador. Respecto a la variable R_p , tampoco mostró diferencia significativa ($p \leq 0.05$) entre tratamientos de labranza (tabla 3). Sin embargo, SIB y AD presentaron los valores medios más altos, luego S y por último M para las profundidades 10 cm - 20 cm y 20 cm - 30 cm, respectivamente. Lo anterior es un indicativo de que los diferentes sistemas de labranza conservacionista (SIB, M y S) no causaron cambios en los atributos físicos del suelo que afectaran a la D_a , R_p y θ_g , las cuales son propiedades que se pueden considerar como indicadores para calificar la calidad del suelo. Estos resultados coinciden con los reportes de Ceballos *et al.* (2010) y Álvarez & Steinbach (2012), respecto al efecto no significativo de D_a y R_p en la capa arable.

Otra de las variables físicas en estudio fue el R_o superficial del suelo generada por los diferentes tratamientos de labranza evaluados (figura 1, 2, 3 y 4). Esta es otro indicador de la calidad del resultado de las labores, sobre todo cuando se requiere tener condiciones adecuadas en la superficie para evitar escurrimiento y aumentar la infiltración del agua.

El R_o en los tratamientos M, AD y S fueron prácticamente iguales (3.36 cm, 3.14 cm y 3.03 cm), mientras que R_o en SIB fue de 2.57 cm, respectivamente, como se observa en las figuras 1, 2, 3 y 4. A pesar de que M y AD dejaron los agregados más grandes, estos no difieren con los de S y SIB y, estadísticamente, no hay diferencia significativa ($p \leq 0.05$) entre ellos, aunque en promedio R_o fue mayor en la parcela preparada con M que en las parcelas de los otros tratamientos. Esta igualdad en R_o también se refleja en el DG_{50} , lo cual tal vez se debe principalmente al patrón de trabajo que presenta cada implemento. Mientras que AD corta e invierte parcialmente el suelo, los implementos de labranza vertical (M, SIB y S) rompen y fragmentan el suelo, pero sin invertirlo; sin embargo, a pesar de ello, no lograron reducir la D_a con respecto a AD en ninguna de las profundidades de muestreo.

En la figura 1 y 2 se observa una rugosidad alta, consecuencia de la labor de AD y M; a partir de esta condición se siguió con la acción de desmenuzamiento de los agregados y la nivelación del suelo que realiza la labor del rastreo después de AD, M y S, con lo que se logra incrementar la rugosidad superficial en comparación con SIB que presenta una rugosidad menor, pero obtenida en un solo paso de tractor (figura, 3).

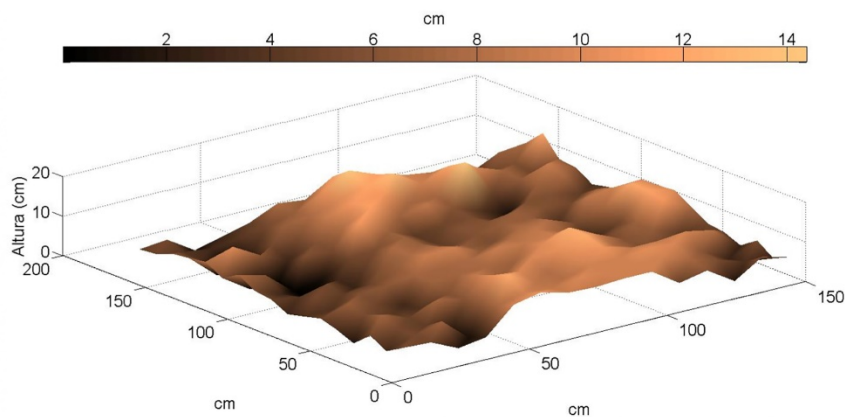


Figura 1. Rugosidad del suelo después de un paso de arado de discos más rastra.
Fuente: Elaboración propia.

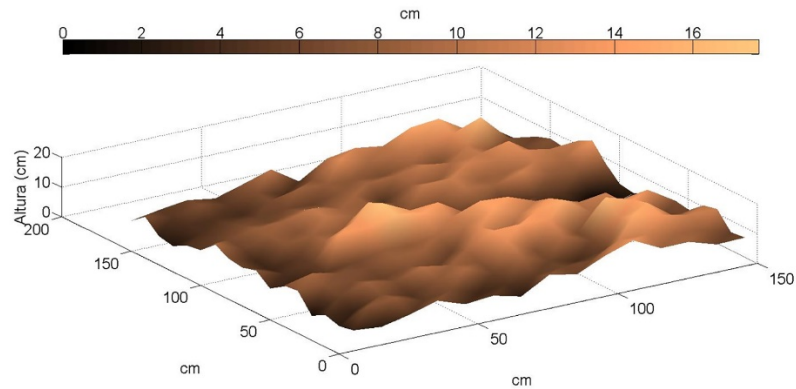


Figura 2. Rugosidad del suelo después del paso del multiarado más rastra.
Fuente: Elaboración propia.

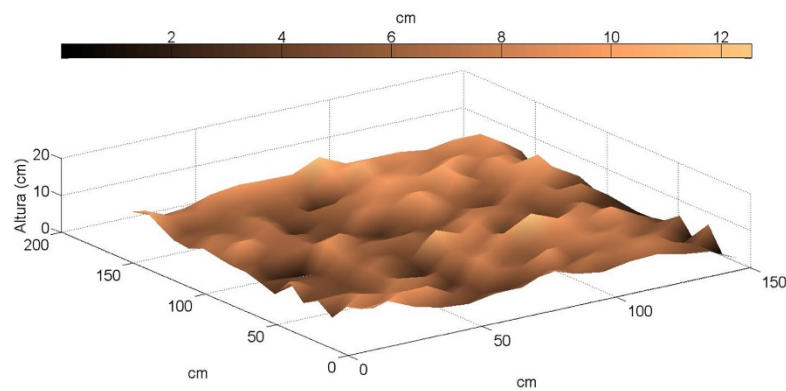


Figura 3. Rugosidad del suelo después del doble paso de subsolador más rastra.
Fuente: Elaboración propia.

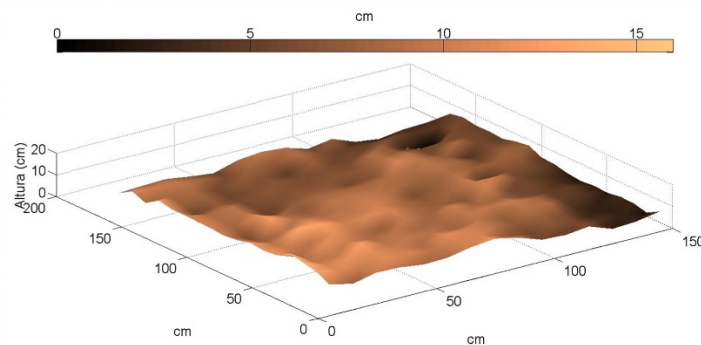


Figura 4. Rugosidad del suelo después de un paso del subsolador integral biomimético.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, cabe resaltar que el acabado superficial del suelo con el paso del SIB fue más uniforme respecto a los demás tratamientos de labranza vertical y convencional; es decir, la altura de las crestas y valles eran parecidos en magnitud en toda la superficie analizada, como se observa en las figuras anteriores. Por tanto, SIB es una opción técnicamente eficiente para la preparación de suelos agrícolas en el semiárido.

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en campo durante la evaluación de los implementos, y de acuerdo con el objetivo e hipótesis planteados en el presente estudio, se llegó a las siguientes conclusiones:

El SIB representa una alternativa sustentable para la preparación primaria del suelo, especialmente para las zonas semiáridas, por lo cual puede utilizarse en lugar del AD+Ra, ya que realiza la misma labor que estos, pero con mejor calidad. Es decir, prepara el suelo para la siembra en un solo paso del tractor, por lo tanto, reduce el consumo de combustible y disminuye el tráfico de maquinaria al eliminar el exceso de laboreo por los pasos de rastra implicados en la labranza convencional.

El desarrollo de equipos de labranza mínima combinada con otros implementos ha resultado ser muy eficaz en la reducción de tiempo y oportunidad de laboreo. El SIB, desde el punto de vista tecnológico, representa una opción sustentable de menor costo para preparar el suelo, ya que la variable rendimiento operativo fue 25% mayor y el consumo de combustible fue 20% menor, respecto a la labranza tradicional (AD+R). Además, su Ro, que es un indicador de calidad de laboreo, fue ligeramente menor que el resto de los tratamientos de labranza evaluados y se logró en un solo paso de tractor, mientras que en los otros tratamientos implicó un paso de rastra.

Referencias

- Aday, S. H., Al-Haliphy, A. L., & Majeed, H. R. (2004). Field study for a modified subsoiler draft requirement in a heavy soil. *Iraqi Journal of Agriculture*, 9(2), 155-166.
- Aday, S. H., Abdul-nabi, M. A., & Ndawii, D. R. (2011). The effect of the lateral distance between the shallow tines of the subsoiler on its draft requirement in a silty clay soil. *Basra Journal of Agricultural Sciences*, 24(1), 29-41.
- Adewoyin, A. O., & Ajav, E. A. (2013). Fuel consumption of some tractor models for ploughing operations in the sandy-loam soil of Nigeria at various speeds and ploughing depths. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 15(3), 67-74.
- Álvarez, R., & Steinbach, H. S. (2012). "A review of the effects of tillage systems of some soil physics properties, water content, nitrate availability and crops yields in the Argentine Pampas". *Soil & Tillage Research* ISSN: 0167-1987, 104, 1-15. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.02.005>
- Arellano-Arciniegas, S., Osuna-Ceja, E. S., Martínez- Garmaño, M. A., & Reyes-Muro, L. (2015). Rendimiento de frijol fertilizado con estiércol bovino en condiciones de secano. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(3), 313-318.
- Bar-Cohen. Y. (2005). *Biomimetics-biologically inspired technologies*. United States of America: CRC Press.
- Bar-Cohen. Y. (2006). Biomimetics-using to inspire human innovation. *Bioinspiration & Biomimetics*, 1(1), 1-12. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-3182/1/1/P01>
- Buckingham, F. (1976). *Fundamentos de funcionamiento de maquinaria* (FMO), serie de cultivo. Illinois, Estados Unidos de América: Deere & Company Service training. Moline.
- Cadena, Z. N. (1999). *Soil Workability as a basis for advice on tillage activities*. (Ph Thesis). Wageningen Agricultural University/Netherlands.
- Cadena-Zapata, M., & Gaytán-Muñiz. T. (2004). Desempeño de implementos de labranza en términos de consumo de energía y calidad de trabajo. *Revista Agraria-Nueva época-año I*. 1(3), 12-17.
- Ceballos, V. D., Hernández, I. O., & Vélez, L J. (2010). Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas de un Andisol del departamento de Nariño. *Revista de Agronomía*, 27(1), 40-48.
- Cabria, F., Calandroni, M., & Monterrubianesi, G. (2002). Tamaño y estabilidad de agregados y su relación con la conductividad hidráulica saturada en suelos bajo labranza convencional y praderas. *Ciencias del Suelo*, 20(2), 69-80.
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). (2013). *Resistencia a la penetración. Guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo*. México: CIMMYT.

- Chirende, B., & Li, J. (2009). Review on application of biomimetics in the design of agricultural implements. *Biotechnology and molecular biology reviews*, 4(2), 42-48.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (31 de diciembre de 2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (17 de abril de 2003a). Norma Mexicana NMX-0182-SCFI-2003, Tractores implementos y maquinaria agrícola - arados de discos - especificaciones y métodos de prueba.
- Diario Oficial de la Federación. (17 de abril de 2003b). Norma Mexicana NMX-0183-SCFI-2003, Tractores implementos y maquinaria agrícola – rastras de discos de levante - especificaciones y métodos de prueba.
- Garibaldi, M. F., García, H. R. V., & Osuna, C. E. S. (2016). *Subsolador integral biomimético*. Campo Experimental Pabellón. CIRNOC-INIFAP. Aguascalientes, México: Folleto Técnico Núm. 68. 26p.
- Gaytán Ruelas, J. G., Muñoz Gómez, F., Chávez Aguilera, N., & Capulín Quinto, J. A. (2005). Evaluación comparativa de los tractores NH 6610 y JD 5715T en los aspectos técnicos, agrotécnicos y económicos. *Revista ciencias técnicas agropecuarias*, 14(4), 14-23.
- Godwid, R. J. (2007). A Review of the effect of the implement geometry on soil failure and implement forces. *Soil & Tillage Research*, 97(2), 331-340. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.06.010>
- Godwin, R. J., Spoor, G., & Soomro, M. S. (1984). The Effect of Time Arrangement on Soil Forces and Disturbance. *Journal Agricultural Engineering Research*, 30, 47-56. doi: [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(84\)80005-0](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80005-0)
- Guo, Z. J., Zhou, Z. L., Zhang, Y., & Li, Z. (2009). Bionic optimization research of soil cultivating component design. *Science in China Series E: Technological Sciences* 52(4), 955-965.
- Hernández, E. A., Osuna, C. E. S., Reyes, M. L., Martínez R. E., & Ritz, R. C. N. Y. (2013). *Sembradora de precisión, versátil y acondicionada para conservar suelo y agua*. Aguascalientes, México: Folleto Técnico Núm. 60. 28p.
- Jury, W. A., Gardner, W. R., & Gardner, W. H. (1991). *Soil Physics*. New York, United States of America: John Wiley & Sons.
- Lobb, D. A., Huffman, E., & Reicosky, D. C. (2007). Importance of information on tillage practices in the modelling of environmental processes and in the use of environmental indicators. *Journal of Environmental Management*, 82(3), 377-387. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.04.019>
- McKyes, E. (1985). *Soil Cutting and Tillage*. New York, United States of America: Elsevier Science Publishing Company Inc.
- Mouazen, A. M., & Ramon, H. (2002). A numerical-statistical hybrid modelling scheme for evaluation of draught requirements of a subsoiler cutting a sandy loam soil, as affected by moisture content, bulk density and depth. *Soil and Tillage Research*, 63(3-4), 155-165. doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00243-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00243-4)
- Narro Farías, E. (1994). *Física de Suelos con enfoque agrícola*. México, Trillas.
- Osuna Ceja, E. S. (1996). Efecto de la lluvia sobre la rugosidad superficial e infiltración del agua en el suelo bajo dos sistemas de labranza. *Agricultura Técnica en México*, 22(1), 3-19.
- Osuna-Ceja, E. S., Arias-Chávez, L. E., Núñez-Hernández, G., & González Castañeda, F. (2015). Producción de forrajes de temporal con estiércol bovino y captación de agua en siembras a triple hilera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(8), 1743-1756.
- Osuna Ceja, E. S., Figueroa Sandoval, B., Oleschko, K., Flores Delgadillo, M. C., Martínez Menes, M. R., & González Cossio, C. F. V. (2006). Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia*, 40(1), 27-38.
- Ren, L. Q., Tong, J., Li, J. Q., & Chen, B. C. (2001). Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: a review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 79(3), 239-263. doi: <https://doi.org/10.1006/jaer.2001.0722>
- Richler, C. M., Fulton, J. P., Raper, R. L., McDonald, T. P., & Zech, W. C. (2011). Effects of transmission gear selection on tractor performance and fuel costs during deep tillage operation. *Soil & Tillage Research*, 113(2), 105-111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.03.002>

- Rocha Rangel, E., Rodríguez García, J. A., Martínez Peña, E., & López Hernández, J. (2012). Biomimética: innovación sustentable inspirada por la naturaleza. *Investigación y Ciencia*, 54, 56-61.
- Rojas S. C., Osuna, C E. S., & Zitz, R. C. N. Y. (2013). *Sembradora mecánica de precisión, versátil para agricultura de conservación. Campo Experimental Pabellón*. Aguascalientes, México: CIRNOC-INIFAP Folleto Técnico Núm. 51.
- Romantchik, K. E., Sandoval Assia, I., Chávez Aguilera, N., Gaytán Ruelas, J., & Mayans Céspedes, P. (2009). Resistencia traccional del subsolador en función del ancho de trabajo. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 1(1), 49-53. doi: <http://dx.doi.org/10.5154/r.inagbi.2009.05.007>
- Statistical Analysis Systems (SAS). (2009). Statistical Analysis Systems for windows. Versión 8. North Carolina, United States of America: SAS Institute Incorporation, Cary.
- Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2015). *Información Agrícola. Avances mensuales por estado*. Recuperado el <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>
- Smith, L. A., & Williford, R. J. (1988). Power requirements of conventional, triplex, and parabolic subsoilers. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers ASAE*, 31(6), 1685-1688. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.30920>
- Spoor, G., & Godwin, R. J. (1978). Experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 23(3), 243-258. doi: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(78\)90099-9](https://doi.org/10.1016/0021-8634(78)90099-9)
- Tong, J., Sun, J., Chen, D., & Zhang, S. (2005). Geometrical features and wettability of dung beetles and potential biomimetic engineering applications in tillage implements. *Soil and Tillage Research*, 80(1-2), 1-12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.012>
- Upadhyaya S., Lancas, K. P., Santos-Filho, A. G., & Raghuvanshi, N. S. (2001). One-pass Tillage Equipment Outstrips Conventional Tillage Method. *California Agriculture*, 55(5), 44-47. doi: <https://doi.org/10.3733/ca.v055n05p44>
- Ventura, E. J., Norton, L. D., Ward, K., López-Bautista, M., & Tapia-Naranjo, A. (2003). *A New Reservoir Tillage System for Crop Production in Semiarid Areas*. St Joseph, Michigan, United States of America: American Society of Agricultural and Biological Engineers ASAE. Paper No 032315. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.14035>
- Wheeler, P. N., & Godwin, R. J. (1996). Soil dynamics of single and multiple tines at speeds up to 20 km/h. *Journal of Agriculture Engineering*, 64(3), 243-250. doi: <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0026>
- Zhang, J., Tong, J., & Ma, Y. (2013). Simulation of bionic anti-drag subsoiler with exponential curve feature using discrete element method. *Applied Mechanics and Materials*, 461, 535-543. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.461.535>