

CONFIGURACIÓN DE HERRAMIENTAS DE LABRANZA VERTICAL PARA REDUCIR DEMANDA DE ENERGÍA

Configuration of Vertical Tillage Tools to Reduce Energy Demand

Martín Cadena Zapata^{1‡}, Santos Gabriel Campos Magaña¹,
Armando López Santos² y Alejandro Zermeño González¹

RESUMEN

Disminuir la demanda de energía en operaciones de labranza puede contribuir a la reducción de costos y a tener un menor uso de combustibles fósiles en los sistemas de producción. Lo anterior es posible si se establecen adecuadas interacciones entre geometría de implementos, configuraciones o arreglos de posiciones entre los mismos, profundidades de trabajo y humedad en el perfil. Se establecieron experimentos bajo un diseño estadístico de bloques al azar con tres repeticiones para evaluar: seis configuraciones de herramientas de labranza vertical tipo cincel, cuantificar la energía aplicada, demanda de fuerza de tiro y caracterizar la calidad de la labor. Para este propósito se construyó un equipo que permitió realizar dichos arreglos; se utilizó un dinamómetro axial y un transductor de tipo integral para reducir errores en el seguimiento y registro de variables. Se acondicionó la cabina del tractor para adaptar la instrumentación de adquisición de datos. Se midieron las variables: fuerza de tiro requerida (kN), sección transversal disturbada (m²), consumo de combustible (L ha⁻¹), calidad de labor en términos de tamaño medio de agregados (mm) y resistencia específica del suelo (kN m⁻²). Los resultados mostraron diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$) entre los tratamientos respecto a calidad de trabajo y consumo de energía. Considerando ambas variables, en relación al de referencia, el mejor arreglo fue el de cinceles delanteros a 0.30 m de profundidad y 0.60 m de distancia entre ellos combinados con un cincel trasero a 0.40 m de profundidad, con lo anterior la demanda de energía se

redujo 10.50% comparado con la configuración convencional. La calidad de trabajo, en relación a la referencia, produjo una reducción de tamaño de agregados de 28%, con el arreglo de cincel trasero alado profundo y cinceles frontales someros.

Palabras clave: evaluación de implementos, consumo de combustible, resistencia específica del suelo, tamaño de agregados.

SUMMARY

Reducing the demand of energy from tillage operations could contribute to decreasing production costs and use of fossil fuels in crop production systems; this can be made possible by establishing adequate interactions between implement geometry, configuration of components, working depth and soil moisture content. In this study, a field experiment was established under a statistical design of random blocks in order to evaluate six basic configurations of vertical tillage tine tools, to quantify applied energy and draught demand and to assess the quality of the operation. To achieve that, a frame was constructed that permits different layouts of tools; an axial and integral type force transducer was used to avoid error when recording and monitoring the variables. The tractor cabin was modified to adapt the instrumentation and data acquisition equipment. Three replications were carried out for each treatment measuring the draught force (kN), disturbed cross section (m²), fuel consumption (L ha⁻¹) quality of operation in terms of medium diameter of aggregates (mm) and specific soil resistance (kN m⁻²). The results show significant differences (Tukey, $P \leq 0.05$) between treatments in relation to work quality and energy demand, considering both variables, relative to the reference, the best layout was shallow chisel tines at the front at 0.30 m working depth and 0.60 m apart, combined with a rear tine working at 0.40m depth, obtaining a reduction of energy of 10.50%. Considering just work quality in terms of aggregate size, a reduction of 28% was obtained with

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, División de Ingeniería. Calzada Antonio Narro 1923. 25315 Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

[‡] Autor responsable (martincadenaz@gmail.com)

² Universidad Autónoma Chapingo, URUZA. 35230 Bermejillo, Durango, México.

the layout of shallow tines at the front and a deep winged rear tine.

Index words: *implement evaluation, fuel consumption, soil specific strength, size of soil aggregates.*

INTRODUCCIÓN

El aumento en el uso de energía de combustibles fósiles para la producción de alimentos, ante la creciente demanda de la población, implica un mayor impacto ambiental (Conforti y Giampietro, 1997). En las labores de manejo del suelo, actualmente se requiere un gran consumo de energía en forma de combustible, ésto, es un factor que puede limitar la actividad agrícola pues reduce el costo beneficio del sistema de producción (Kichler *et al.*, 2007); no obstante, si se implementan cambios tecnológicos apropiados en los sistemas de producción de alimentos, entre ellos agricultura de conservación se estima que se puede reducir hasta 50% el uso de energía fósil en los mismos (Pimentel *et al.*, 2008).

La reducción del uso de energía en los sistemas de producción agrícola, es un tema actual de gran importancia, pues contribuye al éxito financiero de dichos sistemas y disminución de subsidios, además de enfrentar una gran competencia en el mercado globalizado. Los agricultores consideran opciones de reducción de labores y gasto de energía para bajar costos, como es el caso del uso de sistemas de agricultura de conservación, que implica reducción de labranza (Derpsch, 2007). Para muchos agricultores, antes que una conciencia conservacionista, la principal razón de la adopción de los sistemas de agricultura de conservación es la posibilidad de reducción de labores y costos (Steiner, 1998).

Tomando en cuenta lo anterior, un problema a resolver en los sistemas actuales de producción agrícola, es la reducción del uso de energía, por lo que se han desarrollado implementos cada vez más eficientes. Actualmente, en algunos cultivos como trigo, la energía utilizada con labranza convencional representa hasta el 35% del total invertido en el sistema de producción; con menor número de labores este porcentaje se reduce hasta 19% en cero labranza (Tabatabaeefar *et al.*, 2009). Sin embargo, se debe tener cuidado al disminuir la intensidad de la labranza pues en algunos entornos climáticos y cultivos esto puede resultar en bajas significativas del

rendimiento (Agbede, 2006). En este aspecto, la labranza vertical es una mejor alternativa como sistema de conservación ya que aun cuando puede presentarse un pequeño decremento del rendimiento, el ahorro de energía es considerable (Cavalaris y Gemptos, 2002).

Los implementos de labranza vertical tipo cincel, demandan una menor cantidad de energía comparados con el tipo discos usados en los sistemas de labranza convencional (Camacho y Rodríguez, 2007). Dentro de los implementos de labranza vertical, los cinceles angulados demandan menos energía que los cinceles curvos (Raper, 2005a). De acuerdo con Raper y Bergtold (2007), se puede hacer mucho para disminuir el costo de operaciones con labranza vertical vía reducción de uso de energía, seleccionando la adecuada geometría y arreglo de los implementos, profundidad de trabajo y humedad en el perfil del suelo.

Entre los factores que inciden para que una herramienta de labranza requiera una menor o mayor fuerza de arrastre están, la humedad del suelo en el momento de la labor, el ángulo de inclinación entre la punta de la herramienta y el plano horizontal del suelo, el filo de la punta, el tipo de suelo, la profundidad y la velocidad de trabajo así como, la geometría de las partes y aditamentos del implemento y la configuración cuando se trata de una combinación de herramientas como en la siembra directa (Spoor y Godwin, 1990; Fielke, 1996; Tong y Ballel, 2006; Godwin y O'Dogherty, 2007).

El contenido de humedad es tal vez el factor más importante que determina la calidad de labor que se obtendrá (Spoor y Godwin, 1990). El realizar labores en los extremos del contenido de humedad por lo general resulta inconveniente, en un suelo demasiado húmedo se puede incluso dañar la estructura, por compactación, pero si la labor se realiza en un suelo demasiado seco la cantidad de energía a utilizar será mayor (Dexter y Bird, 2001).

El resultado de la labranza dependerá de un óptimo contenido de humedad, como resultado, se obtendrá un menor número de labores, disminuyendo la energía aplicada en la labranza (Keller *et al.*, 2007). Sin embargo, por la variabilidad de condiciones en campo, el conocer el contenido óptimo de humedad para una labor específica no es fácil o directo, el valor cambiará de acuerdo al tipo de implemento y suelo (Hoogmoed *et al.*, 2003), por lo que se hace necesario determinar la interacción entre la humedad del suelo y la geometría o forma del implemento en el resultado tecnológico de la labranza y la demanda de energía (Raper, 2005b).

La reducción de las fuerzas de arrastre y por lo tanto de la energía para las labores, podría disminuirse incorporando elementos vibratorios que minimizan las fuerzas cohesivas del suelo y su resistencia (Szabo *et al.*, 1998). La demanda de energía se puede también reducir trabajando dentro de los límites de laborabilidad del suelo entre los cuales se encuentra el rango óptimo de contenido de humedad para un determinado tipo de implemento (Cadena *et al.*, 2002). Otra posibilidad es determinar la mejor configuración de espaciamiento de cuerpos y profundidades de trabajo para optimizar el uso de energía (Kasisira y du Plessis, 2006). También, un manejo de labranza en un sitio específico trabajando a profundidad variable de acuerdo a donde se localizaron capas compactadas, permitió reducir el uso de energía entre 30% y 50% comparado con un manejo convencional, asumiendo condiciones similares en toda el área de trabajo (Gilandeh, *et al.*, 2006).

Ashrafizadeh y Kushwaha (2003) realizaron una extensa revisión de modelos que tratan de predecir las fuerzas que requieren los implementos de labranza considerando varios factores. Sin embargo, al igual que Tong y Ballel (2006) ellos señalan que se deben hacer mediciones o cuantificaciones en campo bajo diferentes condiciones para validar los modelos y verificar su confiabilidad para realizar aplicaciones en condiciones particulares.

El estudio de la demanda de energía en las operaciones requeridas por los cultivos, es una herramienta de planeación que considera el costo-beneficio de cada uno. Estudios del costo de la labranza basado en energía requerida es muy importante pues se puede determinar cuál es la más eficiente combinación entre tractor e implemento (Serrano *et al.*, 2007).

El ahorro de energía utilizando labranza vertical con cinceles, en comparación con sistemas convencionales, ha sido documentado en varios estudios (Hoogmoed y Derpsch, 1985; Cadena *et al.*, 2004; Camacho y Rodríguez, 2007). Otros investigadores han observado que dentro de un mismo sistema de labranza vertical puede haber una reducción del uso de energía por efecto de arreglos espaciales de los elementos y profundidades de trabajo (Hamza *et al.*, 2006; Kasisira y du Plessis, 2006).

La fuerza requerida por un implemento y la calidad de la labor, dependen de la resistencia específica y de su profundidad de trabajo, de la densidad del suelo y la humedad del mismo al momento de la operación; el espaciamiento entre los cuerpos o cinceles en

combinación con la profundidad crítica de trabajo resultará en diferentes requerimientos de fuerza aún en una misma condición de textura y humedad del suelo (Arvidsson *et al.*, 2004; Raper y Bergtold, 2007; Manuwa, 2009).

Para disminuir el uso de energía con implementos de labranza vertical, es necesario disminuir la resistencia específica por sección transversal del suelo disturbado. Una opción para disminuir la necesidad de fuerza de tracción es determinar los arreglos espaciales o configuraciones óptimas de cuerpos de cada cincel. Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar el área disturbada, la demanda de tiro, consumo de combustible para determinar el consumo de energía y tamaño medio de agregados como indicadores de la calidad de labor, para diferentes arreglos espaciales de herramientas tipo cincel trabajando a diferentes profundidades.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de investigación fue realizado en el Campo Experimental Buenavista de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila localizado 100° 59' 57" O y 25° 23' 42" N, con una altura de 1743 m. El suelo en el sitio experimental es arcillo limoso con un contenido de 31% de arcilla, 35% de limo y 34% de arena; la humedad del suelo fue de 15.90% (método gravimétrico) durante todas las evaluaciones; y tuvo una resistencia a la penetración de 1500 kPa en los primeros 0.20 m con un incremento de hasta 1990 kPa a una profundidad de 0.30 m. El largo de la parcela de cada uno de los tratamientos fue de 25 m. El diseño experimental empleado fue de bloques al azar considerando seis tratamientos con tres repeticiones.

Las herramientas de labranza vertical empleadas en la investigación fueron cuerpos tipo cincel acoplados en doble marco (Figura 1), construido específicamente para esta investigación, de tal forma que permitiera hacer los arreglos de distancia horizontal entre los cuerpos de los cinceles así como el ajuste de profundidad de trabajo en forma independiente.

Para determinar la resistencia específica a la roturación del suelo, la calidad de labor, así como el consumo de energía, se diseñaron seis tratamientos en arreglos espaciales de dos cinceles delanteros y uno trasero en el marco de evaluación siguiente: tratamiento uno, con separación de 0.30 m entre cuerpos y profundidades de trabajo igual adelante y atrás

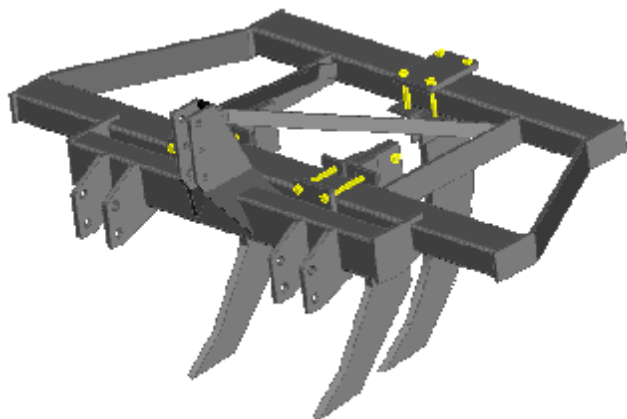


Figura 1. Doble marco empleado en la evaluación: el diseño permite mover los cincelos en forma individual para ajustar el espaciado entre los mismos en las dos barras; los acoples de cada cincel a la barra delantera permiten ajustar la profundidad de trabajo de cada cuerpo frontal.

(considerado arreglo de referencia), los tratamientos dos y tres aumentan a 0.38 y 0.70 m de distancia entre cuerpos respectivamente, todos laborando a una profundidad de 0.40 m; el tratamiento cuatro con arreglo de 0.30 m de separación entre cuerpos se trabajó con los cincelos delanteros a una profundidad de 0.30 m y el trasero a 0.40 m; el tratamiento cinco mismo arreglo espacial que el anterior pero trabajando todos a 0.40 m de profundidad, además, el cincel trasero modificado con alas de 0.30 m de ancho total; y el tratamiento seis también en arreglo espacial entre cuerpos de 0.30 m, los cuerpos adelante a 0.30 m de profundidad y el trasero también modificado con alas trabajando a 0.40 m de profundidad (Cuadro 1).

En la Figura 2 se muestran el marco e instrumentación diseñado y construido para la determinación de la demanda de energía y calidad de

Cuadro 1. Arreglos espaciales de los cincelos, para la determinación de la energía aplicada para estallamiento de suelo y calidad de labor en labranza vertical.

| Tratamientos | Distancia | | Profundidad | |
|--------------|----------------|------------------------|-------------------|--|
| | Entre cincelos | Dos cincelos frontales | Un cincel trasero | |
| | ----- m ----- | | | |
| 1 | 0.30 | 0.40 | 0.40 | |
| 2 | 0.38 | 0.40 | 0.40 | |
| 3 | 0.70 | 0.40 | 0.40 | |
| 4 | 0.30 | 0.30 | 0.40 | |
| 5 | 0.30 | 0.40 | 0.40+Alas | |
| 6 | 0.30 | 0.30 | 0.40+Alas | |

labor con diferentes arreglos espaciales, profundidades y dos tratamientos con la incorporación de alas expansoras.

Para la cuantificación de energía aplicada en la labranza vertical se utilizaron 2 tractores: uno de tracción sencilla marca John Deere, modelo 6403 y otro de doble tracción marca New Holland modelo 6810 con potencia al motor de 83 y 75 kW y una fuerza a la barra de tiro de 55 y 67 kN, respectivamente. Para la medición de la magnitud de la fuerza de tiro y otras fuerzas de reacción del suelo a la labranza se emplearon dos dinamómetros uno Axial y otro Integral con capacidad de 45 y 80 kN con constantes de calibración de 11.8 y 42.6 N por mv, respectivamente.

Para la medición del consumo de combustible, se empleó un medidor de flujo marca Omega modelo FTB300 con una capacidad de medición de 30-300 mL min⁻¹, instalado en forma de bucle cerrado entre la línea de alimentación a la bomba de inyección del tractor y la tubería de retorno al tanque, de tal manera



Figura 2. Equipo construido para la determinación de la demanda de energía con diferentes arreglos de cincelos. (a) Sensor integral. (b) Arreglo del tratamiento seis con cincel trasero con alas y cincelos frontales ajustados a 0.30 m de profundidad.

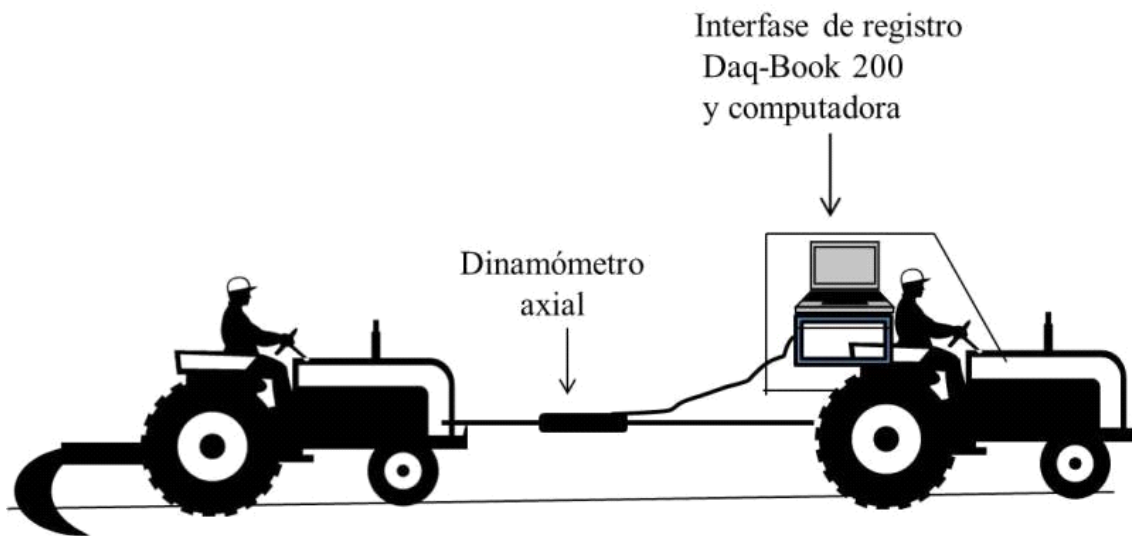
que solo se midió el consumo neto de combustible durante la labor. Para la determinación del tamaño de agregados con tamizado en seco (Díaz-Zorita *et al.*, 2000) se empleó un juego de cinco tamices con área de 0.25 m² con mallas de sección cuadrada de 100, 75, 50, 25 y 12.5 mm por lado respectivamente. La medición de la sección transversal de disturbación del suelo se llevó a cabo con un medidor de perfil de 20 varillas con una separación de 0.10 m entre ellas.

Para determinar la fuerza de reacción del suelo se empleó un convertidor analógico digital Daq Book 200

marca IOtech con una velocidad de muestreo de 1000 Hz y dos acondicionadores de señal DBK-16 y DBK-43A con dos y ocho canales respectivamente, ambos marca IOtech con una ganancia de 100 a 12 500 micro deformaciones. El tractor fue acondicionado con una doble cabina para la instalación de los equipos e instrumentos de medición.

Los arreglos uno y dos de evaluación se llevaron a cabo empleando dos tractores (Figura 3a). Se utilizó un dinamómetro Axial (45 kN de capacidad) que fue colocado entre los dos tractores para determinar la fuerza

a)



b)

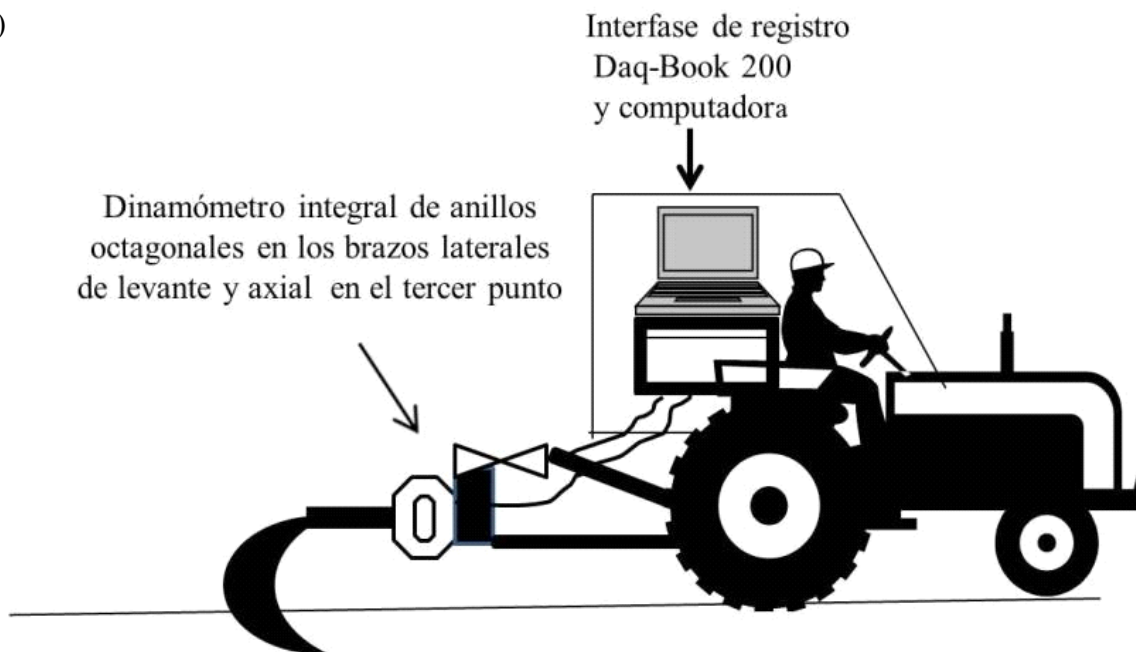


Figura 3. Equipos e instrumentos empleados en la evaluación. (a) Esquema para la evaluación con dos tractores, sensor axial de fuerza de tiro con un sistema de adquisición de datos. (b) esquema de evaluación con sensor integral.

de tiro (kN), la cual fue registrada en el DAQ-book 200 a una velocidad de muestreo de 256hz. Para los tratamientos uno, cuatro, cinco y seis se empleó el dinamómetro integral (Figura 3b) que permite medir la fuerza de tiro, la fuerza vertical y la localización de la fuerza resultante (kN), con el uso de un solo tractor. Durante la labor de evaluación se registraron además el consumo de combustible ($L\ ha^{-1}$) y la velocidad de trabajo ($m\ s^{-1}$). Todos los tratamientos se realizaron a una velocidad de trabajo de $3\ km\ h^{-1}$.

Posterior a la labor, se determinaron: la superficie de labor (m^2); diámetro medio (ponderado) de agregados (mm) y la sección transversal de fractura del suelo (m^2) tomando nueve muestras por tratamiento. Previo al análisis estadístico de los resultados de las fuerzas de reacción del suelo, fue necesario transformar los datos obtenidos de una dominancia de tiempo a una dominancia de frecuencia mediante el uso de la transformada rápida de Fourier siguiendo el método descrito por Campos *et al.* (2004).

RESULTADOS

La Figura 4 es una muestra de la adquisición de datos durante la determinación de la demanda de fuerza de tiro, empleando el dinamómetro axial de (45 kN) en el tratamiento dos. En esta gráfica se aprecia claramente la fuerza demandada cuando el implemento está penetrando en el suelo así como cuando alcanza la profundidad de trabajo.

La Figura 5 muestra la demanda de fuerza de tiro empleando el transductor integral. En ésta se muestra

la magnitud de fuerza para una repetición en los tratamientos cinco y seis. Se muestra también la fuerza requerida anterior a la penetración en el suelo, además de la localización de una capa compacta del suelo en la última parte del recorrido (dato 4821), antes de levantar el implemento.

En la Figura 6 se muestra un ejemplo del patrón de fractura del suelo resultado del tratamiento cinco así como el método de medición del área disturbada empleando el medidor de perfil.

En el Cuadro 2 se muestran los resultados obtenidos de las cinco variables; fuerza (N), área de disturbada (m^2), consumo de combustible ($L\ ha^{-1}$), calidad de agregados (mm) y resistencia específica del suelo ($N\ m^{-2}$) a la labranza vertical; considerados como indicadores en la determinación de consumo de energía y calidad de la labor.

Del análisis de la variable fuerza, en el Cuadro 2, se observa que la demanda de ésta, tiende a ser mayor conforme se aumentó el espaciamiento entre cinceles de 0.30 a 0.70 m, conservando una misma profundidad de trabajo. Esto se debió a que a mayor espacio entre los cinceles, se tuvo una mayor superficie de resistencia del suelo entre cincel y cincel. Por otro parte, la demanda de fuerza bajó (tratamiento cuatro) cuando se realizó la labor con un arreglo de 0.30 m de espaciamiento entre cinceles y se disminuyó la profundidad de trabajo de los cinceles frontales a 0.30 m, manteniendo la profundidad del cuerpo de atrás a 0.40 m.

La reducción de la fuerza se debió a que a menor profundidad de los cinceles frontales se reduce el área de resistencia del suelo no disturbado para estos. Esta

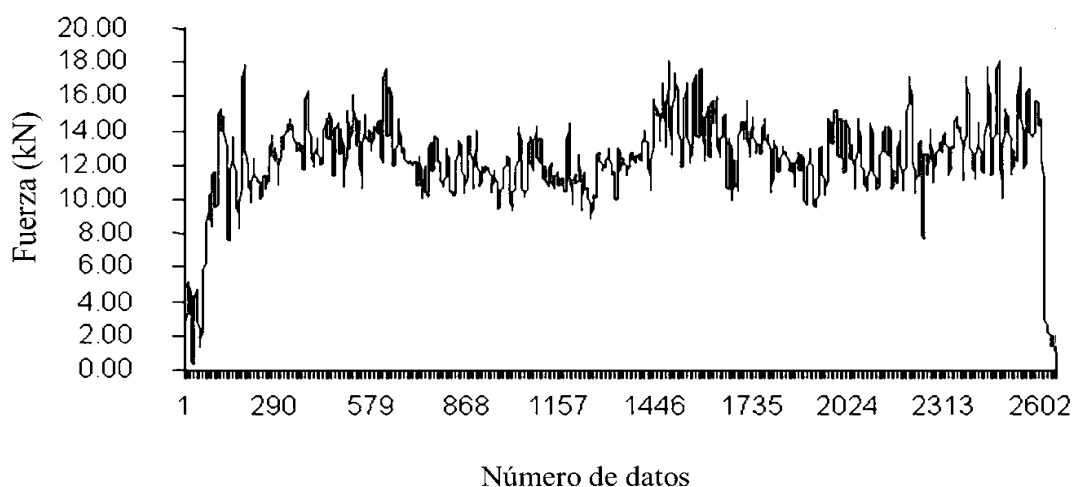


Figura 4. Adquisición de datos de fuerza empleando el dinamómetro axial en una corrida con el tratamiento dos.

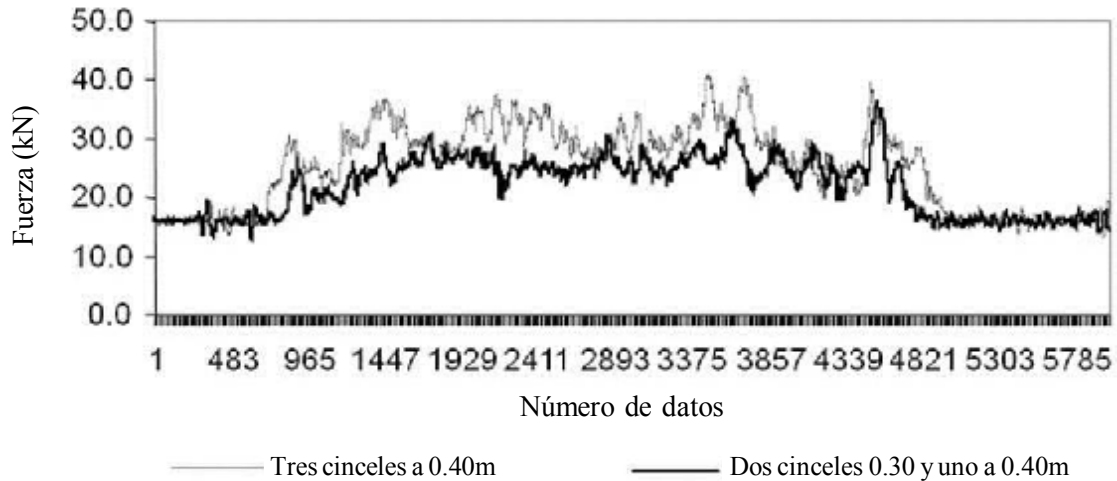


Figura 5. Datos obtenidos con el sensor integral en una corrida con los tratamientos tres y cinco con variación en la profundidad de trabajo.

posición relativamente somera (0.30 m) de los cinceles frontales deja solo una parte de la profundidad de trabajo no disturbada (0.10 m) para que sea trabajada por los cinceles traseros que están posicionados para llegar hasta 0.40 m de profundidad. En el Cuadro 2 se observa que el alternar la profundidad de los cuerpos delanteros y traseros, resultó en menor demanda de energía comparado con el arreglo y profundidades de referencia (tratamiento uno).

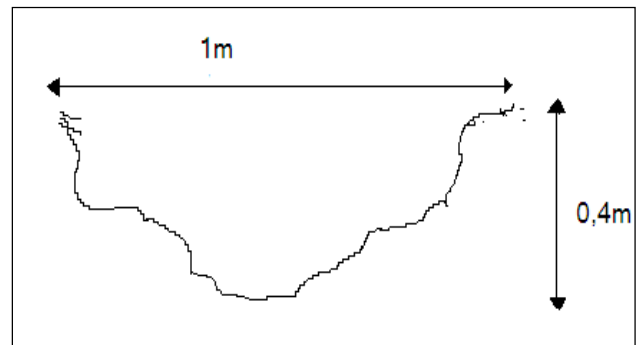
En el tratamiento cuatro, la disminución de demanda de fuerza de tiro fue de 40%, lo que resulta en una diferencia estadística significativa de 10.50% de reducción de energía demandada en la labor con respecto al tratamiento uno, pero con igual calidad estadísticamente en el tamaño de agregados. Reducciones similares de energía han sido obtenidas por Kasisira y du Plessis (2006), quienes alternando

profundidades, con series de cinceles en la profundidad crítica de fractura de un suelo franco areno-arcilloso alcanzaron reducciones en el consumo de energía cuando los cinceles delanteros trabajaron a una profundidad de 0.8 en relación con los de atrás.

El uso de alas en el cincel trasero, en combinación con cinceles someros adelante (tratamiento seis), tiene un comportamiento estadísticamente igual en demanda de fuerza y energía que el tratamiento uno (arreglo de referencia) (Cuadro 2). Sin embargo, se puede observar que la calidad de trabajo del tratamiento seis es la mejor en comparación a los otros cinco tratamientos, pues se obtuvo la condición deseable de los menores tamaños de agregados, es decir, con este arreglo se obtiene una mejor calidad de labor utilizando la misma cantidad de energía. En otros trabajos también se reporta disminución de energía al añadir alas a los cinceles;



a



b

Figura 6. Área de suelo disturbada. (a) Medición en campo de la sección transversal de fractura del suelo con el medidor de perfil (b) Diagrama a partir de datos de campo que representa el área fracturada ó disturbada del tratamiento cinco.

Cuadro 2. Variables para la determinación de energía empleada y calidad de labor para seis tratamientos con diferentes arreglos de cinceles en labranza vertical.

| Arreglo | Fuerza kN | Área m ² | Tamaño de agregados mm | % | Combustible L ha ⁻¹ | Resistencia kN m ⁻² | Energía MJ ha ⁻¹ |
|---------|--------------|------------------------|---------------------------|-----|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 9.8 d | 0.28 c | 18.3 b | 138 | 25.6 b | 34.9 c | 918.3 b |
| 2 | 12.1 c | 0.36 b | 19.2 b | 145 | 23.6 c | 33.2 cd | 846.5 c |
| 3 | 16.4 b | 0.61 a | 31.9 a | 241 | 18.7 d | 26.7 e | 670.8 d |
| 4 | 5.8 e | 0.21 d | 17.3 b | 131 | 22.9 c | 27.4 de | 821.4 c |
| 5 | 21.2 a | 0.30 c | 14.3 c | 108 | 31.4 a | 70.2 a | 1126.3 a |
| 6 | 10.9 cd | 0.20 d | 13.2 c | 100 | 26.4 b | 54.1 b | 947.0 b |

Medias con letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$).

Kumar y Thakur (2005), señalan que la resistencia específica del suelo pudo disminuir hasta 26.92 % utilizando cinceles rectos con alas en comparación con cinceles convencionales rectos trabajando por encima de una profundidad crítica de 0.30 m en un suelo limo arcilloso.

Por otra parte, Cholaky *et al.* (2010), encontraron que para un escarificador alado, la resistencia específica fue de 110 kN m⁻² en suelo seco compactado y 70 kN m⁻² en suelo seco no compactado, esto último muy similar al resultado del tratamiento cinco de este experimento.

El tratamiento en el que se obtuvo la mejor combinación de resultados con base en los indicadores: calidad de agregados, consumo de combustible y resistencia específica del suelo (17.3 mm, 22.9 L ha⁻¹ y 27.4 kN m⁻² respectivamente) fue el tratamiento cuatro, en el que se trabajó con una combinación de distancia entre subsuelos de 0.30 m, trabajando los cinceles frontales a 0.30 m y el cincel trasero a 0.40 m de profundidad. La disminución de resistencia específica al combinar profundidades es importante pues normalmente entre más profundidad de trabajo, mayor es la resistencia (Raper, 2005a).

En lo que se refiere al área disturbada de suelo, el mayor valor se obtuvo con el tratamiento tres, sin embargo, el tamaño de agregados fue el mayor de todos y por lo tanto, la menor calidad de trabajo. Esto indica que el tamaño de agregados se ve afectado considerablemente por la distancia entre cuerpos de cinceles, a mayor distancia mayor tamaño de agregados. McKyes (1985), señala que el tamaño medio de agregados está relacionado con la cantidad de energía específica aplicada, entre menos energía se aplique en una labor, el DMA (Diámetro Medio de Agregados) resultante será mayor y menor la eficiencia para disgregación del suelo.

La menor eficiencia para la disgregación se observó en el tratamiento tres, donde se obtuvo un tamaño de agregados 2.4 veces más grande comparado con el tratamiento seis donde se tiene la mayor disgregación (Cuadro 2). A partir del resultado de calidad de labor para el tratamiento tres se supone que se requerirá de una cantidad adicional de energía para reducir el tamaño de los agregados y obtener una adecuada preparación de la cama de semillas, en comparación con la energía que se requeriría con los arreglos cinco y seis donde el cincel trasero ha sido modificado con alas, obteniendo en estos dos últimos tratamientos tamaños de agregados estadísticamente iguales (Cuadro 2). Lo anterior concuerda con lo señalado por McKyes (1985) en relación a la energía específica requerida para disminuir el tamaño de agregados; Hoogmoed *et al.* (2003) mencionan que en condiciones de suelo seco medido en laboratorio, se requiere de hasta 3.33 unidades de energía por cada unidad de reducción en tamaño de agregados.

En lo relativo a la energía total requerida (MJ ha⁻¹), esta fue menor en el tratamiento tres pues por la mayor separación entre cuerpos, presenta una menor área de trabajo efectivo y por lo tanto menor resistencia específica del suelo comparado con los otros arreglos (Cuadro 2). Sin embargo, como se mencionó en el párrafo anterior, en este arreglo se obtuvo la más baja calidad de labor en términos de tamaño de agregados.

El tratamiento seis, cincel trasero con alas y cinceles frontales someros, presentó el mejor trabajo en términos de calidad de agregados (13.2 mm), con un consumo de energía intermedio (947.0 MJ ha⁻¹), aunque con una resistencia específica (54.1 kN ha⁻¹) significativamente alta en comparación a los otros tratamientos, pero equiparable a la obtenida por otros autores (Cholaky *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

- La combinación más adecuada de los resultados de los indicadores de área disturbada, resistencia específica de suelo, consumo de combustible y tamaño de agregados se obtuvo en el tratamiento cuatro, manteniendo la separación de referencia entre cuerpos pero escalonando la profundidad, menor adelante y mayor atrás. Manteniendo la separación de referencia entre cuerpos (0.30 m), pero, disminuyendo a una profundidad menor (0.30 m) los cinceles delanteros y manteniendo la profundidad de referencia (0.40 m) en el cincel trasero modificado con alas (tratamiento seis), se obtuvo la mejor calidad de tamaño de agregados. Con respecto al tratamiento de referencia, el tamaño de agregados se redujo en 28% con un incremento de demanda de energía del 3.10% en comparación al resto de los arreglos.

- En las condiciones del experimento, la demanda de energía en labranza vertical puede ser disminuida al aumentar la separación de las herramientas de trabajo, sin embargo, esto resultó en un tamaño de agregados más grande conforme aumentó esa separación, lo cual indica que existe una distancia crítica máxima de trabajo entre cuerpos de cinceles. La máxima separación evaluada entre cuerpos, resultó en la menor resistencia específica del suelo y por lo tanto la más baja demanda de energía de todos los tratamientos (arreglo 4); no obstante, el gran tamaño de agregados obtenido en ese arreglo, no es el adecuado para el establecimiento de cultivos, por lo que se tendría que realizar labores adicionales para reducirlos.

LITERATURA CITADA

- Agbede, T. M. 2006. Effect of tillage on soil properties and yam yield on an Alfisol in southwestern Nigeria. *Soil Tillage Res.* 86: 1-8.
- Arvidsson, J., T. Keller, and K. Gustafsson. 2004. Specific draught for mouldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents. *Soil Tillage Res.* 79: 221-231.
- Ashrafizadeh, S. R and R. L. Kushwaha. 2003. Soil model in front of a tillage tool action: A review. CSAE/SCGR. Paper No. 03-210 Canadian Society of Agricultural Engineers, Meeting. Montreal, Quebec, Canada.
- Cadena-Zapata, M., W. B. Hoogmoed, and U. D. Perdok. 2002. Field studies to assess the workable range of soils in the tropical zone of Veracruz, Mexico. *Soil Tillage Res.* 68: 83-92.
- Cadena-Zapata, M., T. Gaytán-Muñoz y A. Zermeño-González. 2004. Desempeño de implementos de labranza en términos de consumo de energía y calidad de trabajo. *Revista Agraria Nueva Época* 1: 12-17.
- Camacho-Tamayo, J. H. y G. A. Rodríguez-B. 2007. Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua en el suelo. *Agric. Téc.* 67: 60-67.
- Campos Magaña, S. G., M. Cadena-Zapata., S. Jácome-Maldonado, A. Reynolds-Chávez y S. Uribe-Gómez. 2004 Sistema integral de simulación de fuerza aplicado al desarrollo de herramientas de labranza de conservación. 2004. *Terra Latinoamericana* 22: 161-168.
- Cavalari, C. K. y T. A. Gemtos. 2002. Evaluation of four conservation tillage methods in the sugar beet crop. *The CIGR E-Journal*. Volume 4. The Internet-First University Press. Cornell University Library. Ithaca, NY, USA.
- Conforti, P. and M. Giampietro. 1997. Fossil energy use in agriculture: an international comparison. *Agric. Ecosyst. Environ.* 65: 231-234.
- Cholak, C., J. M. Cisneros, and R. Balbuena. 2010. Field performance of a winged scarifier as a function of soil compaction and water content. *Chilean J. Agric. Res.* 70: 150-158.
- Derpsch, R. 2007. The no tillage revolution in South America. pp. 54-68. *In: Proceedings of the Conference on Farm Technology*. Edmonton, Alberta, Canada.
- Dexter, A. R. and N. R. A. Bird. 2001. Methods for predicting the optimum and the range of water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil Tillage Res.* 57: 203-212.
- Díaz-Zorita, M., J. H. Grove, and E. Perfect. 2000. Sampling and sieving procedures for measuring soil dry aggregates size distributions. *In: J. E. Morrison (ed.). Proceedings of the 15th ISTRO Conference*. Texas Agricultural Experimental Station. Temple, TX, USA.
- Fielke, J. M. 1996. Interactions of the cutting edge of tillage implements with soil. *J. Agric. Eng. Res.* 63: 61-72.
- Gilandeh, Y. A, R. Alimardani, A. Khalilian, A. Keyhani, and S. H. Sadati. 2006. Energy requirement of site-specific and conventional tillage as affected by tractor speed and soil parameters. *Int. J. Agri. Biol.* 8: 499-503.
- Godwin, R. J. and M. J. O'Dogherty. 2007. Integrated soil tillage prediction models. *J. Terramechanics* 44: 3-14.
- Kasisira, L. L. and H. L. M. du Plessis. 2006. Energy optimization for subsoilers in tandem in a sandy clay loam soil. *Soil Tillage Res.* 86: 185-198.
- Keller, T., J. Arvidsson, and A. R. Dexter. 2007. Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. *Soil Tillage Res.* 92: 45-52.
- Kichler, C. M. J., P. Fulton, R. L. Raper, W. C. Zech, T. P. McDonald, and C. J. Brodbeck. 2007. Spatially monitoring tractor performance to evaluate energy requirements of variable depth tillage and implement selection. ASAE paper no. 071028. ASAE Annual International Conference. Minneapolis, MN, USA.
- Kumar, A. and T. C. Thakur. 2005. An investigation into comparative test of conventional and winged subsoilers. ASAE paper no. 051061. ASAE Annual International Meeting. Tampa, FL, USA.
- Hamza, M. A., G. P. Riethmuller, and W. K. Anderson. 2006. A new generation ripper to reduce the cost of removing soil compaction. *Proceedings of the Australian Agronomy Conference*. Perth, Western Australia.
- Hoogmoed, W. B. and R. Derpsch. 1985. Chisel Ploughing as an alternative tillage system in Parana Brazil. *Soil Tillage Res.* 6: 53-67.

- Hoogmoed, W. B., M. Cadena-Zapata, and U. D. Perdok. 2003. Laboratory assessment of the workable range of soils in the tropical zone of Veracruz, Mexico. *Soil Tillage Res.* 74: 169-178.
- McKyes, E. 1985. *Soil cutting and tillage. Developments in agricultural Engineering.* Elsevier Science Ltd. Amsterdam, The Netherlands.
- Manuwa, S. I. 2009. Performance evaluation of tillage tines operating under different depths in a sandy clay loam soil. *Soil Tillage Res.* 103: 399-405.
- Pimentel, D., S. Williamson, C. E. Alexander, O. Gonzalez-Pagan, C. Kontak, and S. E. Mulkey. 2008. Reducing energy inputs in the US food system. *Hum Ecol* 36: 459-471.
- Raper, R. L. 2005a. Subsoiler shapes for site-specific tillage. *App. Eng. Agric.* 21: 25-30.
- Raper, R. L. 2005b. Force requirements and soil disruption of straight and bentleg subsoilers for conservation tillage systems. *Appl. Eng. Agric.* 21: 787-794.
- Raper, R. L. and J. S. Bergtold. 2007. In row subsoiling: A review and suggestions for reducing cost of this conservation tillage operation. *Appl. Eng. Agric.* 23: 463-471.
- Serrano J. M., J. O. Peça, J. Marques da Silva, A. Pinheiro, and M. Carvalho. 2007. Tractor energy requirements in disc harrow systems. *Biosyst. Eng.* 98: 286-296.
- Spoor, G. and R. J. Godwin 1990. Soil loosening requirements, implements and techniques. *HGCA Research Review.* No. 19. UK.
- Steiner, K. G. 1998 *Conserving natural resources and enhancing food security by adopting no tillage.* TÖB Publication No. F-5/e GTZ. Eschborn, Germany.
- Szabo, B., F. Barnes, S. Sture, and H. Y. Ko. 1998. Effectiveness of vibrating bulldozer and plow blades on draft force reduction. *Trans. ASAE* 41: 283-290.
- Tabatabaeefar, A., H. Emamzadeh, M. Ghasemi Varnamkhasti, R. Rahimizadeh, and M. Karimi. 2009. Comparison of energy of tillage systems on wheat production. *Energy* 34: 41-45.
- Tong, J. and Z. M. Ballel. 2006. Effect of the rake angle of chisel plough on soil cutting factors and power requirements: A computer simulation. *Soil Tillage Res.* 88: 55-64.