

EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LAS HERRAMIENTAS AGRÍCOLAS PARA LA LABRANZA DE SUELOS CULTIVABLES

ENERGETIC EFFICIENCY OF AGRICULTURAL TOOLS FOR FARMING ARABLE SOILS

Ortiz-Laurel, H.^{1*}; Rosas-Calleja, D.¹; Rossel-Keeping, D.²; Schlegel, M.².

¹Colegio de Postgraduados *Campus* Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, municipio de Texcoco, Estado de México, México. ²Universidad de Rostock, Justus-von-Liebig Weg 8, 18059. Rostock Alemania.

***Autor Responsable:** hlaurel@colpos.mx

RESUMEN

La labranza del suelo es considerada como una operación fundamental en la que se sustenta la producción de alimentos. Una labranza del suelo correctamente programada puede lograrse con el empleo de mecanización con la más novedosa tecnología mediante el uso de tractores, apropiadas herramientas, e implementos correctamente seleccionados. La preservación del potencial productivo de los suelos agrícolas depende principalmente de la selección correcta y del uso del equipo agrícola de labranza, su correcta programación y de los sistemas de labranza empleados, en especial cuando se busca incrementar los rendimientos y la calidad de los alimentos en correcto balance con la energía aplicada. Con base en lo anterior, se muestran técnicas de trabajo mecanizado para la labranza de los suelos bajo una labranza válida económicamente.

Palabras clave: mecanización, balance energético, sustentabilidad, tecnología agrícola, laboreo de suelos.

ABSTRACT

Soil farming is considered a fundamental operation on which food production is sustained. Land farming that is correctly programmed can be achieved with the use of mechanization with the most novel technology through the use of tractors, appropriate tools, and implements that are selected correctly. The preservation of the productive potential of agricultural soils depends primarily on the correct selection and use of agricultural farming equipment, its correct programming, and the farming systems employed, especially when there is an attempt to increase the yields and quality of the foods in correct balance with the energy applied. Based on this, mechanized working techniques are shown, used to farm soils under economically valid farming.

Keywords: mechanization, energetic balance, sustainability, agricultural technology, soil farming.



INTRODUCCIÓN

La labranza puede definirse como la manipulación mecánica de un sistema complejo y muy sensitivo denominado suelo en el cumplimiento de algún propósito. En la agricultura, la labranza de los suelos es una parte integral en la producción de los cultivos. Esta es una práctica muy antigua que ha cambiado relativamente poco a través de los años, excepto que en la actualidad se realiza con mayor facilidad debido al desarrollo y la utilización de maquinaria agrícola más diversa, más eficiente y más sofisticada. Esta evolución técnica debe estar vinculada con un incremento en la productividad de los cultivos, dando cumplimiento al objetivo de la empresa agrícola de mantener la producción, la rentabilidad y, lógicamente, el ingreso de los agricultores. Las prácticas de labranza que no se ajusten a esos requisitos, es decir, efectividad de los costos de producción, respuestas positivas de los rendimientos, preservación de las condiciones del suelo, entre otras, no tendrán un lugar entre los productores (Köller, 2003).

Todas las operaciones involucradas en la producción de los cultivos también deben tomar en cuenta la conservación y el mejoramiento de los suelos agrícolas, con el fin de asegurar y mantener altos rendimientos a largo plazo. En general, durante el proceso de producir cultivos, sin diferenciar el tipo de agricultura practicada, los objetivos fundamentales que persigue la labranza son (Kepner et al., 1976; Krause y Lorenz, 1984):

- Producir una estructura adecuada para una cama de siembra.
- Controlar las malas hierbas o remover plantas de cultivo indeseables (clareo).
- Manejar residuos de cultivos.
- Minimizar erosión, implementando prácticas como labranza al contorno en camellones y colocación adecuada del residuo.
- Establecer configuraciones específicas superficiales del terreno para la siembra, el riego, el drenaje, operaciones de cosecha, etcétera.

- Incorporar y mezclar fertilizantes, pesticidas, abonos orgánicos o acondicionadores del suelo dentro del mismo.
- Llevar a cabo una segregación que involucra mover el suelo de una capa a otra, quitar piedras u otros objetos extraños o raíces de los cultivos.



Figura 1. Labranza del suelo en la preparación de la cama de siembra.

Esta manipulación mecánica de los suelos, como muchos otros procesos tecnológicos, involucra tres elementos principales: la fuente motriz, la máquina o implemento, y el material a ser procesado; es decir, el suelo (Figura 1). Una herramienta de labranza es definida como un elemento individual en un equipo o implemento que trabaja en el suelo, como puede ser un disco del

arado, disco de la rastra o cincel de un cultivador que recibe energía del tractor o desde otra fuente de potencia, manipula el suelo y cambia su estado y propiedades (Ashburner y Sims, 1984).

Las fuerzas que se aplican a la herramienta de labranza

para producir un efecto deseado sobre el suelo pueden ser medidas con la mayor exactitud, pero los efectos probables no se pueden predecir con precisión, debido a cambios en el diseño de una herramienta. Consecuentemente, no es de sorprender que el diseño del equipo de labranza sea aún considerado más un arte que una ciencia. Por un lado, el tamaño, la forma, el afilado y la velocidad de ejecución de las operaciones por las herramientas de labranza y, en segundo lugar, el tipo de suelo y la condición a la cual se efectúa la labranza influyen significativamente en el área de suelo aflojada y en el tamaño del terrón producido (Figura 2). Con el acoplamiento de aditamentos en forma de alas en la parte inferior de una herramienta tipo cincel recto se estudió la fracturación de un suelo de textura marga limosa arcillosa y con un rango de contenido de humedad de 15.4% a 16.75%, notándose un incremento del área de suelo fracturada en 2.35 veces, aunque la resistencia específica de tiro se redujo 44% cuando se comparan con el efecto de la misma herramienta sin los aditamentos (Kumar y Thakur, 2005). El objetivo de este estudio es presentar



Figura 2. Efecto sobre el área de suelo fracturada con una modificación al diseño de la herramienta de labranza.

un análisis descriptivo de la interacción entre diferentes herramientas de labranza y el suelo, lo que permitirá entender y predecir el tipo de efecto que ocasionaría una herramienta de una forma dada sobre el suelo, para así apoyar su apropiada selección. La descripción y análisis servirá, asimismo, como apoyo en el diseño de nuevas y más eficientes herramientas agrícolas.

Selección de herramientas agrícolas

Es importante señalar que, normalmente, los criterios para la selección, diseño y fabricación de herramientas agrícolas son distintos; el comprador selecciona aquella herramienta que sea capaz de realizar la labor de una manera eficiente, sin romperse, con el menor costo de operación y con la menor resistencia al suelo, menor consumo de potencia, ajustes sencillos y rápidos (Ashburner y Sims, 1984), mientras que el fabricante diseña la herramienta para un bajo costo de producción y para su construcción, la máxima resistencia del material con un peso mínimo, y facilidad de fabricación, entre otros aspectos. A pesar de esas restricciones se ha generado una cantidad notable y diversificada de máquinas agrícolas, tecnológicamente avanzadas, que han permitido a los agricultores realizar aplicaciones de bajo costo de todas las técnicas sobre el suelo (Figura 3). La potencia disponible del tractor puede afectar el tamaño o número de herramientas que es posible utilizar, sin embargo, ésta rara vez ejerce influencia sobre el tipo de herramienta que es posible usar para una labor específica. Con el objeto de simplificar este problema se procederá a discutir los aspectos de diseño de las herramientas para las operaciones de labranza básicas principales en forma individual, aun cuando

en la práctica normalmente se utilizan herramientas que ejecutan dos o más operaciones de labranza básicas al mismo tiempo.

Existen numerosos modelos y versiones de las distintas herramientas, algunas de las cuales son bastante primitivas, otras son versiones modernas, y algunas novedosas de las herramientas antiguas (Figura 4), los cuales son clasificados de acuerdo con lo que hacen y la forma en que trabajan. Por ejemplo, los arados rompen y mezclan el suelo, derivado de una combinación de los cortes producidos sobre el suelo y de la separación de los terrones para ser volteados y terminen de romperse y poder así invertir el orden de los estratos del suelo (Bosoi *et al.*, 1987; Finney, 1982). Las máquinas roturadoras penetran y abren el suelo a varias profundidades con una acción de corte vertical u horizontal para fragmentar el suelo endurecido e invertir el orden de los estratos. El suelo es fracturado a lo largo de la profundidad de trabajo, los

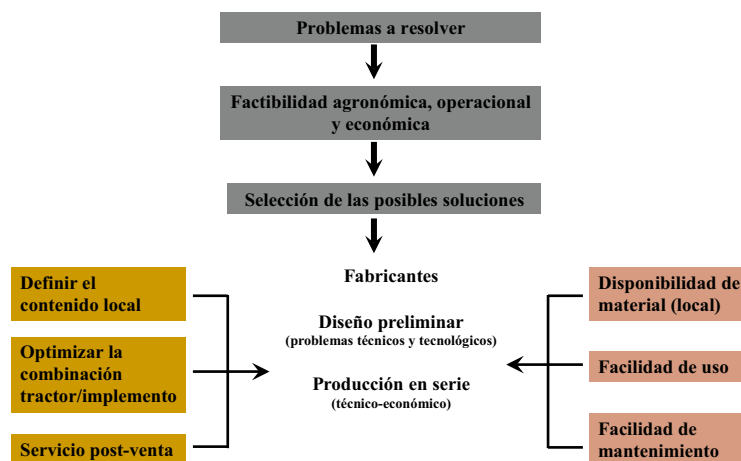


Figura 3. Esquema básico de identificación de máquinas agrícolas apropiadas para el desarrollo de agricultura local.



Figura 4. Herramientas de labranza del tipo de arrastre con diferentes configuraciones de diseño.

terrones que se formaron de operaciones previas de labranza son fragmentados, las malezas son arrancadas, las semillas, herbicidas y fertilizante son colocados bajo la superficie, la cual es nivelada, y la costra que se forma es fragmentada (Sitkei, 1976).

Parámetros técnicos y económicos

Los aparatos que mezclan el suelo, primeramente lo rompen y mezclan con aparatos rotatorios de movimiento libre o controlado. Las rastras y los arados de discos usan herramientas de rotación libre, mientras que las rotatorias que son operadas a través del eje de la toma de fuerza del tractor incluyen cultivadores, labradores y rastras rotatorias (Perdok y Kouwenhoven, 1994). Las operaciones de labranza del suelo pueden representar hasta 60% del consumo total de energía de la explotación, por lo que ciertos parámetros, como el consumo de energía, tiempo de trabajo de las distintas operaciones y potencia requerida para mover las herramientas, son fundamentales para calcular los costos de producción. Considerando a la aradura como un ejemplo, se requiere conocer los parámetros funcionales, operacionales y dinámicos. Los funcionales y los operacionales incluyen el tamaño de la parcela que va a ser labrada, qué tan eficiente es el arado para voltear el suelo, su capacidad de trabajo y qué tan bien fragmenta el suelo (Figura 5). La profundidad y anchura del área labrada proporcionan el área de superficie cubierta y volumen de suelo labrado. La resistencia a la pulverización depende de la textura y la estructura; es decir, de la densidad de masa y el contenido de humedad. Los parámetros dinámicos comprenden la cantidad de energía utilizada para completar el trabajo (Spoor, 1975; The International Commission of Agricultural Engineering, 1999; Upadhyaya *et al.*, 1994). La eficiencia del volteo del suelo es importante para saber cuánta de la capa superficial es enterrada, lo cual adquiere importancia agronómica cuando el estiércol o fertilizante tiene que ser incorporado en el suelo. También es importante qué porción del suelo es fragmentado, lo que depende del tipo de arado, velocidad de aradura y tipo de suelo. Los diversos tipos de herramientas lo fragmentan de manera diferente y entre mayor sea la velocidad de avance mayor fragmentación se logrará por la acción de las herramientas (Ortiz Laurel y Rössel Kipping, 2007). En la práctica, para efectos de sustentabilidad y economía, la velocidad de movimiento está limitada entre $2-3 \text{ m s}^{-1}$.

Es importante conocer qué tan eficiente es un arado para determinar la relación entre el área de superficie

labrada y el tiempo que se lleva realizarla. Usualmente esta es definida como la capacidad de trabajo en condiciones normales de operación, incluyendo el tiempo empleado para girar en las orillas de los terrenos "cabeceeras", las paradas para ajustar la calibración, para cargar combustible, etcétera. Es importante indicar que la capacidad de trabajo efectiva está dada por la condición teórica, en la cual un arado laborea una sola hilera de terreno sin interrupción. Este es el tiempo neto donde se excluyen las interrupciones mencionadas anteriormente (Kepner *et al.*, 1978). Esos dos valores pueden ser expresados como la superficie labrada en un tiempo dado (ha h^{-1}), el volumen de suelo que es movido en un tiempo dado ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) y el tiempo que se emplea para cada unidad de área de superficie (h ha^{-1}).

Determinación del consumo de energía

Continuando con el arado como ejemplo, el consumo de energía puede ser indicado como dependiente de: a) las características del suelo, siendo las más importantes su resistencia y volumen a ser desplazado; b) las características del arado, su peso y el tamaño y tipo de disco; y c) la manera en que el trabajo es realizado, número, longitud y profundidad de las hileras de suelo formadas por el arado sobre el terreno (Gill y Vanden Berg, 1968). El consumo de energía puede ser expresado en términos de kilos de combustible diesel consumido por el tractor por unidad de superficie (kg ha^{-1}) o en kilowatts hora por hectárea (kWh ha^{-1}), pero cuando el trabajo se realiza a diferentes profundidades, esta unidad del consumo no refleja un resultado comparable, requiriéndose entonces el consumo de energía por metros cúbicos de suelo desplazado. Por ejemplo, entre mayor es la resistencia del suelo a la penetración y mayor su volumen, mayor será la energía requerida para cortarlo y levantarlo sobre la cara de un disco (Bosoi *et al.*, 1987). La potencia requerida del tractor también se incrementa entre más pesado es el arado y varía con el número y características de los elementos de trabajo del arado. El consumo aproximado de combustible en L h^{-1} de cualquier tractor puede obtenerse multiplicando su valor de potencia (kW) por uno dentro del rango (0.164-0.184). La potencia de arrastre absorbida por la combinación de tractor/implemento puede ser calculada con una ecuación, aunque primeramente debe determinarse la resistencia (R) absorbida por el arado en la labranza del suelo, la cual está expresada por:

$$R = \rho * l * \rho \text{ (daN)}$$



Figura 5. Instrumentos para medir la fuerza de tiro del implemento y determinar el patinaje y velocidad real de movimiento de la combinación tractor-implemento.

Donde: R es la resistencia absorbida por el implemento de labranza (N), p es la profundidad del surco (dm), l es el ancho del surco (dm), ρ es el coeficiente de la resistencia del suelo (N dm^{-2}).

Por lo que la potencia efectiva (Pe) en la barra de tiro se calcula con la expresión:

$$Pe = R * v / 100 \text{ (kW)}$$

Donde: v es la velocidad para realizar la aradura (m s^{-1}).

Como R y Pe representan valores requeridos promedios, es normal que se encuentren puntos de mayor fuerza que requieren de una potencia en la barra de tiro (Pg), equivalentes a alrededor de $3/2$ de la potencia efectiva promedio. Conociendo la eficiencia de la potencia en la barra de tiro se puede entonces calcular esa potencia del motor necesaria para identificar al tipo apropiado de tractor. Por lo anterior, se deben adoptar aquellas técnicas de labranza del suelo con las cuales se obtengan las mayores reducciones en tiempo de trabajo, disminución del consumo de energía y menor número de pasada de las máquinas sobre la superficie cultivada y que, al mismo tiempo, aseguren un rendimiento satisfactorio. De la misma manera, los tratamientos utilizados para trabajar el suelo pueden ser reducidos al evaluar cuidadosamente los efectos de las diferentes herramientas y seleccionar las más adecuadas y eficientes. Esto no es solamente una cuestión de encontrar la más correcta, sino que también tiene el propósito de mejorar el manejo del suelo al optimizar la conservación de la fertilidad y reducir los riesgos de su posible degradación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los efectos de las operaciones de labranza en el cultivo pueden variar mucho de acuerdo con las condiciones de clima, tipo de suelo y cultivo. Esto explica en parte la gran variedad de herramientas disponibles para labrar el suelo y el amplio rango de posibilidades de cómo las tareas pueden ser realizadas. En la agricultura sostenible, en el corto plazo, el propósito es mejorar la eficiencia del consumo de la energía fósil y optimizar el uso de agroquímicos y nutrientes. Estas metas pueden lograrse al implementarse actividades de labranza "en tiempo oportuno", con implementos del tipo de arrastre que incorporen distintas herramientas, que permitan realizar varias operaciones en una sola pasada; por ejemplo, combinadas con una sembradora (Buckingham, 1976; Davis et al., 1982). La aceptación de esos requisitos ha conducido a que las técnicas de labranza del suelo evolucionen hacia una restricción máxima del número de operaciones requeridas y una reducción en la profundidad, intensidad y frecuencia de las operaciones de labranza. Por otro lado, los tractores e implementos deben ser fácilmente ajustados y acoplados a las variantes condiciones de un terreno a otro y de una estación a otra. Así, se les puede ofrecer a los usuarios las soluciones modulares extremadamente versátiles con muchas funciones, una alta capacidad de trabajo y con aptitud para realizar una rápida intervención (Sitkei, 1976). La energía de los implementos del tipo de arrastre está relacionada principalmente a la intensidad del corte ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$) y la resistencia de la herramienta aumentará linealmente con la velocidad. Debido a esto, la potencia requerida del tractor (velocidad * fuerza) se incrementa al cuadrado.

CONCLUSIONES

Las tendencias de la maquinaria para la labranza de los suelos muestran el papel decisivo que juegan los fabricantes, quienes han puesto más atención que nunca a las necesidades de los usuarios. Así, la presión para la adopción de las técnicas de una labranza válida económicamente y la siembra de cultivos de granos y cereales para hacerlos más competitivos, parte del hecho de que es indispensable adoptar máquinas tecnológicamente avanzadas e innovadoras, las cuales puedan reducir los costos mientras que se asegura que las operaciones agrícolas sean realizadas a tiempo y con efectividad. Así, los agricultores pueden ahora entrar en el virtuoso círculo del desarrollo sustentable mediante la adopción de técnicas que son amigables con el agroecosistema, mientras que se aseguran resultados técnicos y económicos satisfactorios.

LITERATURA CITADA

- Ashburner J., Sims B. 1984. Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Costa Rica. 75-188.
- Bosoi E.S., Verniaev O.V., Smirnov I.I., Sultan-Shakh E.G. 1987. Theory, construction and calculations of agricultural machines. Amerind Publishing Co. Pvt. Ltd. New Delhi, India. 29-229.
- Finney J.B. 1982. The role of discs in primary cultivations. *The Agricultural Engineer*. 37(1): 15-19.
- Gill W.R., Vanden Berg G.E. 1968. Soil Dynamics in Tillage and Traction. *Agriculture Handbook* No. 316. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. E.U.A. 117-459.
- Kepner R.A., Bainer R., Barger E.L. 1978. Principles of Farm Machinery. 3ª. Edición. AVI Publishing Company, Inc. E.U.A. 112-176, 195-208.

- Köller K. 2003. Techniques of soil tillage. Soil Tillage in Agroecosystems. Edited by El Titi, A. CRC Press. E.U.A. 1-25.
- Krause R., Lorenz F. 1984. Soil Tillage in the Tropics and Subtropics. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Alemania. 310 p.
- Kumar A., Thakur T.C. 2005. An investigation into comparative test of conventional and winged subsoilers. Proceedings of the 2005 ASAE Annual Meeting. Paper No. 015061. American Society of Agricultural Engineers. Tampa, Florida, USA. 16 p.
- Ortiz Laurel H., Rössel Kipping, D. 2007. Herramientas para la Labranza de los Suelos Agrícolas. Colegio de Postgraduados. México. 160 p.
- Perdok U.D., Kouwenhoven J.K. 1994. Soil-tool interactions and field performance of implements. Soil & Tillage Research. 30: 283-326.
- Sitkei G. 1976. Soil Mechanics Problems of Agricultural Machines. Traducción por el Agricultural Research Service, USDA and the National Science Foundation, Washington, D.C. USA. 14-138.
- Spoor G. 1975. Fundamentals aspects of cultivation. Soil physical conditions and crop production. Technical Bulletin No. 29. MAFF, HMSO. Londres. 128-144.
- The International Commission of Agricultural Engineering. 1999. CIGR Handbook of Agricultural Engineering: Plant Production Engineering. Vol. III. (Stout and Cheze eds). American Society of Agricultural Engineers. 184-217.
- Upadhyaya S.K., Chancellor W.J. Perumpral J.V., Schafer R.L., Gill W.R., Vanden Berg G.E. 1994. Advances in soil dynamics. Vol. I. ASAE Monograph No. 12. ASAE. 255-280.

