

MODELOS DE SIMULACION PARA ESTIMAR EL CONSUMO ENERGETICO REQUERIDO PARA EFECTUAR LA LABRANZA

Simulation Models to Estimate the Energy Consumption Required for the Performance of Tillage

Enrique Martínez Rubin de Celis¹, José Dimas López-Martínez², J. Ramón Díaz-Martínez¹
y Ricardo Valdez Cepeda³

RESUMEN

De 1994 a 1997, un estudio se condujo en la Comarca Lagunera con el objetivo de determinar la relación funcional entre los implementos de labranza y los requerimientos energéticos para la preparación del suelo. La estimación de la energía requerida para la realización de la labranza de los suelos agrícolas, se determinó con base en la alteración realizada por los implementos utilizados en este estudio, los cuales fueron: arado subsoleador, arado de discos, arado de vertedera, arado de cinceles y rastra de discos. Se presenta una serie de ecuaciones que pueden servir como herramienta de soporte en la toma de decisiones para la selección y operación de implementos de labranza y se concluye que los modelos resultantes pueden utilizarse con fines de predicción.

Palabras clave: *Energía, intensidad de labranza, medidor de flujo.*

SUMMARY

From 1994 to 1997, an experiment was done in the Comarca Lagunera, Mexico. The objective was to determine the relationship between tillage equipment and the energy required to prepare the soil. The estimation of the energy required to accomplish tillage in agricultural soils was determined based on the alteration realized by the equipment used in this study, which were disks, moldboard, subsoil and chisels ploughs, and disk harrow. A series of equations is shown which can serve as a tool in decision-making for the selection and operation of tillage

equipment. It is concluded that the resulting models can be used for prediction purposes.

Index words: *Energy, tillage intensity, flow measurement device.*

INTRODUCCION

A la fecha, muy poco se ha aportado sobre los diferentes requerimientos funcionales para la movilización de la maquinaria sobre el campo, así como para conocer las necesidades específicas de cada cultivo (Sheafer *et al.*, 1992). Generalmente, la acción de los implementos de labranza se evalúa al considerar como parámetro indicador, la producción de los cultivos y no con base en el conocimiento científico del efecto propio del implemento sobre las propiedades físicas del suelo. Al respecto, Alberts *et al.* (1989) mencionaron que el cambio en la densidad aparente después de la labranza es difícil de predecir, debido al limitado conocimiento de cómo un implemento interactúa con el suelo, influenciado por la velocidad de labranza, la profundidad de labranza y la cohesión. Por lo que Pla y Russo (1992) y Torcasso (1992) propusieron partir de un conocimiento más profundo de los efectos de la labranza y los factores que afectan a la misma, de manera que permita un proceso de adopción (cambio de tecnología) realmente efectivo.

Hadas y Wolf (1983) indicaron haber comprobado la existencia de una interdependencia entre el grado de fragmentación del suelo y la cantidad de energía aplicada al suelo, o sea que "Existe una relación directa entre la cantidad de energía aplicada al sistema estructural del suelo y el grado de estructuración después de su aplicación". Además, indicaron que el término "Labranza efectiva" es un parámetro usado para evaluar la energía óptima que debe aplicarse al suelo para comparar la eficiencia de los diferentes implementos de labranza. Al respecto, Martínez y Pissani (1995) mencionaron que la intensidad de la labranza está directamente relacionada con el consumo energético y que ésta es un buen indicador de la eficiencia de trabajo de los implementos, ya que la magnitud de la energía que

¹ Instituto Tecnológico Agropecuario La Laguna. Apartado Postal 3F. Torreón, Coahuila. (emarti@mixmail.com)

² Facultad de Agricultura y Zootecnia-Universidad Juárez del Estado de Durango. Apartado Postal 142, 35000 Gómez Palacio, Dgo., México. (joshua@teleinfo.com.mx)

³ Centro Regional Universitario Centro Norte UACH, Apartado Postal 196, 98001 Zacatecas, Zac., México.

se maneja en la relación suelo-implemento, depende de la profundidad promedio de labranza, anchura de corte del implemento, velocidad de desplazamiento y uniformidad del laboreo en sí, agrupados en el término "Intensidad de labranza".

Por lo anterior, la relación entre las propiedades estructurales de un suelo y sus cambios provocados por la acción de los implementos de labranza deben determinarse para definir los requerimientos de labranza para cada tipo de suelo. El objetivo del presente trabajo fue determinar la relación funcional entre la influencia de los implementos de labranza y los requerimientos energéticos para la preparación del suelo.

MATERIALES Y METODOS

Este trabajo se realizó, de 1994 a 1997, en la Comarca Lagunera, en terrenos del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias) y en el área experimental del Instituto Tecnológico Agropecuario de la Laguna (SEP-SEIT-DGETA), en un suelo Xerosol háplico, comprendido dentro del grupo Sierozem. Los suelos de este grupo son de color café grisáceo, de bajo contenido de materia orgánica, con horizontes de acumulación de yeso y cal cerca de la superficie (cuando hay por lo menos una incipiente intemperización) y con tendencia a acumular sales de sodio. En la región, el suelo está clasificado dentro de la serie coyote, el cual por la superficie que cubre y por sus características físico-químicas es el de mayor importancia dentro del distrito de riego 017.

Los trabajos se establecieron en los ciclos de primavera-verano y en otoño-invierno durante tres años. Los tratamientos consistieron en preparar el terreno previamente descansado, con los implementos tradicionales de labranza utilizados en la región: arado subsoleador, arado de vertedera, arado de discos, arado de cinceles, rastra de discos, y labranza cero. Estos tratamientos se establecieron en unidades de 10 x 20 m, en un diseño en bloques al azar con tres repeticiones y cinco submuestreos en las unidades experimentales.

El establecimiento de los tratamientos se realizó en terrenos con más de tres años de descanso, con textura migajón arcillosa, contenido de materia orgánica de 1.2%, densidad aparente de 1.32 g cm⁻³ y un contenido de humedad de 14%. Durante el establecimiento se registraron las siguientes variables: patinaje (Pat), la cual

se determinó con base en distancia, velocidad real de desplazamiento (Vr), determinada con base en el tiempo requerido para realizar cada recorrido; ancho de corte (A), el cual se realizó al medir el avance del corte en cada pasada del implemento; profundidad promedio de labranza (PPL), midiendo la distancia entre la superficie del terreno y el fondo de trabajo de cada implemento; altura y ancho de cresta (C, Ac), los cuales se cuantificaron en la superficie; y energía (E), requerida por tratamiento, determinada mediante el medidor de flujo (Figura 1). Esto, aunado al estudio realizado, tanto del terreno alterado, como del fondo de trabajo en cada unidad experimental donde se midió el esfuerzo al corte por medio del marco de esfuerzo torcional, la resistencia a la penetración con un penetrómetro de cono tipo agrícola, el resquebrajamiento y la forma del terreno por donde pasó la herramienta de corte, permitió determinar la intensidad de labranza (IL) en cada tratamiento (Cuadros 1 y 2).

Se utilizaron tractores de 80 HP con rodado trasero 18.4 x 30 con una presión de 15 lb plg⁻² con lastre líquido a 75%, los implementos fueron los recomendados por los fabricantes para el tipo de tractor utilizado y, para la determinación del consumo energético, se instaló un sistema medidor de combustible en el tractor (Figura 1), el cual consistió en un depósito graduado (1), con capacidad para 1 L conectado a una llave de dos vías (4), a la que se conectó por la otra parte el conducto que sale del tanque de combustible del tractor (2). La salida de esta llave se conectó a la entrada de la bomba de combustible (8) del motor del tractor (7). Por otro lado, se bifurcó la salida del combustible de retorno (9), con otra llave de paso (5), la cual conecta la línea de retorno del combustible, por un lado al tanque del tractor (2) y por el otro a un segundo depósito graduado (3). Ambas llaves de paso se interconectaron con la palanca de levante hidráulico (12) de manera que, al bajar el implemento, la primera llave de paso (4) desconecta el tanque del tractor y conecta el depósito graduado (1), así también la segunda llave de paso (5) desconecta la descarga de combustible de retorno hacia el tanque (2) y conecta la línea para descargar en un segundo depósito graduado (3). Ambas llaves de paso quedan conectadas por un chirrión de tipo universal (11), con la palanca de levante hidráulico del tractor (12), para así lograr que automáticamente se conecte y desconecte el sistema al levantar o bajar el implemento. El depósito graduado (1) se recargó en las cabeceras en el momento de registrar el consumo.

Para determinar los volúmenes de suelo alterado, debido a la acción de cada tipo de implemento de labranza utilizado en este estudio, se hicieron excavaciones en cada unidad experimental, quitando cuidadosamente la capa de terreno que se aflojó por el implemento, hasta el fondo de

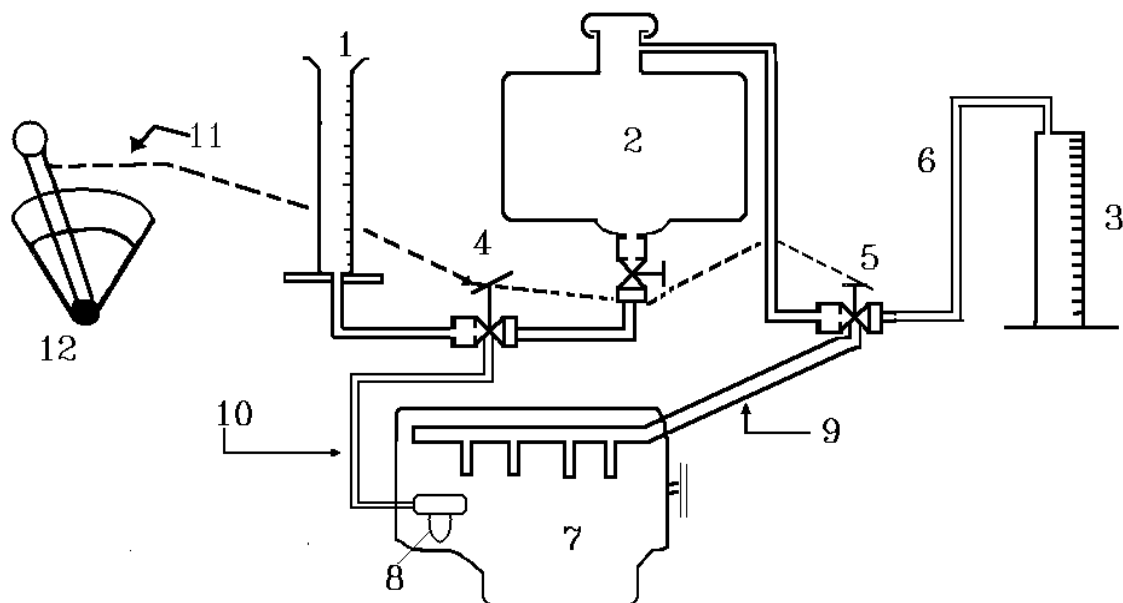


Figura 1. Medidor de flujo.

trabajo de cada herramienta de corte utilizada, midiendo y registrando la forma de trabajo en cada tratamiento, el volumen de suelo alterado, y la dureza y el resquebrajamiento (terreno semi-aflojado por la acción de los implementos) dejado en el fondo de trabajo.

RESULTADOS

Los promedios de los datos obtenidos, de las variables observadas al establecimiento de los ciclos agrícolas, se concentraron en el Cuadro 1, donde puede apreciarse que fue el arado subsoleador que produjo el mayor patinaje y, contra lo esperado (debido al consumo de energía), con el arado de vertedera en promedio se registraron valores por abajo de la media en relación con

los demás tratamientos, aunque en dos ciclos posteriores estuviera muy cerca del arado de discos. El arado de vertedera fue el que registró el mayor consumo energético y provocó la mayor intensidad de labranza, al realizar un corte más uniforme y requerir más esfuerzo para el desplazamiento en el terreno, dejando en el fondo de trabajo mayor resistencia a la penetración, lo que se atribuye al alisamiento por el desplazamiento de la herramienta al realizar el corte.

El arado de discos, al facilitar su desplazamiento sobre el terreno debido al giro de los discos, presentó un menor requerimiento energético, asimismo, al dejar cavidades en el fondo de trabajo, originó una intensidad de labranza un poco menor al trabajar a la misma

Cuadro 1. Variables determinadas al establecerse los tratamientos.

Tratamientos	Patinaje	Velocidad real	Ancho de corte	PPL [†]	Intensidad de labranza	Cresta	Ancho de cresta	Energía
	%	m s ⁻¹	m	cm	%	- - - -	cm - - - -	kW ha ⁻¹
A. Cinceles	19	1.42	2.05	17	38.8	10	10	18.6
A. Discos	20	1.33	0.87	30	93.3	17	20	49.2
R. Discos	8.2	1.42	1.94	17	56.6	8	12	17.6
A. Subsoleador	26	1.0	1.10	45	63.4	12	30	34.7
L. Cero	0	0	0	0	0	0	0	0
A. Vertedera	17	1.11	1.04	30	96.7	14	15	53.9

[†] PPL = profundidad promedio de labranza.

profundidad, pero dejando el fondo aún con pequeñas grietas, lo que originó menor resistencia a la penetración que la presentada por el arado de vertedera. El arado subsoleador, que presenta mayor agresividad para realizar la acción de aflojamiento y desfonde de la capa arable, trabajó a mayor profundidad que los demás implementos, pero registró una menor intensidad al espaciar los timones (lo que origina menores volúmenes de suelo removido), propiciando requerimientos energéticos inferiores a los de los arados antes mencionados, pero al disminuir la distancia entre los timones estos parámetros se incrementaron.

Con base en los resultados estadísticos se determinó que entre la intensidad de labranza y la energía utilizada (kW ha^{-1}) para cada tratamiento, existe una relación significativa cuyo coeficiente de determinación ($R^2 = 0.935$). Este indica una alta dependencia entre estos dos parámetros, por lo que se propone la Ecuación 1 para estimar el consumo energético requerido al preparar el suelo en función de la intensidad de labranza originada por un implemento determinado. Además, las Ecuaciones 2, 3, 4 y 5 para la estimación del requerimiento energético con los implementos para ellas especificados.

Ecuación 1 ó general

$$RE = -3.123 + (0.5512)(IL) \quad R^2 = (0.935) \quad (1)$$

Donde:

RE = requerimiento energético, (kW ha^{-1}),

IL = intensidad de labranza, (%)

La Ecuación 2 para los arados subsoleador y de cinceles, cuando el ancho de corte de cada timón es menor o igual que la distancia (o separación) entre los timones (cuando en la superficie no queda terreno sin alterar):

$$RE (\text{kW ha}^{-1}) = -3.123 + (183.733)(PPL) - [(91.876)(PPL)(Dt)]/Act \quad (2)$$

Cuando la distancia entre los timones sea mayor que el ancho de corte de cada timón (en la superficie queda terreno sin alterar), la ecuación se reduce a:

$$RE (\text{kW ha}^{-1}) = -3.123 + [(27.56)(Act)]/Dt \quad (3)$$

Donde:

RE = requerimiento energético, (kW ha^{-1})

PPL = profundidad promedio de labranza, (m)

Dt = distancia entre timones, (m)

Act = ancho de corte por timón, (m)

La Ecuación 3 para el arado de discos y la rastra de discos:

$$RE (\text{kW ha}^{-1}) = -4.9052 + (183.733)(PPL) - [(2.5722)(Dd)]/A \quad (4)$$

Donde:

A = ancho de corte del implemento, (m)

PPL = profundidad promedio de labranza, (m)

Dd = diámetro de los discos, (m)

La Ecuación 4 para el arado de vertedera:

$$RE (\text{kW ha}^{-1}) = -4.9052 + 183.73PPL - (2.5722)(Ar/A) \quad (5)$$

Donde:

A = ancho de corte del implemento, (m)

Ar = ancho del cuerpo de la vertedera, (m)

PPL = profundidad promedio de labranza, (m)

Las Ecuaciones 1, 2, 3, 4 y 5 se desarrollaron asumiendo las siguientes consideraciones:

El tractor y los implementos de labranza en condiciones adecuadas de operación, la realización de las labores, con los implementos debidamente nivelados, y los rangos para los valores de las variables consideradas, deben de establecerse dentro de los estándares de operación, los implementos deben de ser los recomendados para el tractor a utilizar, la profundidad promedio de labranza en la región es de 30 cm, las labores de preparación del suelo deben de realizarse con el terreno en su punto friable (para el suelo en estudio 14%).

Las ecuaciones propuestas están referidas a su intensidad de labranza, la cual presenta un valor diferente para cada implemento y condición de laboreo, por lo que los resultados pueden usarse para comparar la eficiencia del trabajo de los implementos que se utilizan para realizar la preparación del suelo, tanto en función del grado de preparación, como del consumo energético, o bien, para estimar la energía requerida para preparar un predio determinado.

Las Ecuaciones 2 y 3 permiten estimar los requerimientos energéticos para los implementos de corte que no ocasionan la cobertura de los residuos anteriores, como son: el arado de cinceles y el arado subsoleador, en cuyo caso puede observarse, en el Cuadro 2, la variación de la intensidad de la labranza y los requerimientos energéticos al hacer variar teóricamente la PPL (en m) y

Cuadro 2. Valores predichos de la intensidad de labranza y del requerimiento energético ante la variación de la profundidad de laboreo (PPL) de cada implemento utilizado.

	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉
Arado subsoleador									
Act	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Dt	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
PPL	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
IL	99.99	91.66	83.33	74.99	66.66	58.33	49.99	41.66	33.33
E	51.99	47.40	42.81	38.21	33.62	29.03	24.43	19.84	15.25
Arado de cinceles									
Act	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
Dt	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
PPL	0.20	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12
IL	61.90	58.80	55.71	52.61	49.52	46.42	43.33	40.23	37.14
E	30.99	29.29	27.58	25.88	24.17	22.46	20.76	19.05	17.35
Arado de discos									
Nc	3	3	3	3	3	3	3	3	3
A	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Dd	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
PPL	0.30	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22
IL	92.61	89.28	85.95	82.61	79.28	75.95	72.61	69.28	65.95
E	47.92	46.09	44.25	42.41	40.57	38.74	36.90	35.06	33.22
Arado de vertedera									
Nc	3	3	3	3	3	3	3	3	3
A	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Ar	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
PPL	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.20	0.18	0.16	0.14
IL	93.32	86.66	79.99	79.99	73.33	66.66	59.99	53.32	46.66
E	48.31	44.64	40.97	37.30	33.62	29.95	26.71	22.59	18.92
Rastra de discos									
A	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
Dd	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558
PPL	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07
IL	45.52	42.19	38.85	35.52	32.19	28.85	25.52	22.19	18.85
E	21.97	20.13	18.29	16.45	14.62	12.78	12.78	10.94	09.10

I₁, I₂, I₃...I_n = Implemento con la profundidad promedio de labranza 1, 2, 3...n.

Act = ancho de corte por timón

Dt = distancia entre timones

Nc = número de cuerpos

A = ancho de corte del implemento

Ar = ancho del cuerpo

IL = intensidad de labranza

PPL = profundidad promedio de labranza

Dd = diámetro de discos

E = requerimiento energético

manteniendo fijos tanto el ancho de corte como la distancia entre los timones. La Figura 2 presenta la gráfica del comportamiento de la IL y la E (kW ha⁻¹) al realizar la labor de subsuelo al variar el ancho de corte de cada timón, lo cual, para una profundidad de trabajo determinada, depende de las características del suelo, la velocidad de labranza y las condiciones del suelo en el momento del laboreo. En esta figura puede observarse cómo, al reducirse el ancho de corte de cada timón, se presenta una disminución en el consumo energético requerido. La Ecuación 2 presenta una variación debido a la presencia o no de un área de traslape en la superficie de suelo alterado, ya que cuando la distancia entre los timones origine que quede terreno sin alterar en la superficie, de la ecuación original se elimina el término

correspondiente al volumen de traslape, con lo que queda la Ecuación 3.

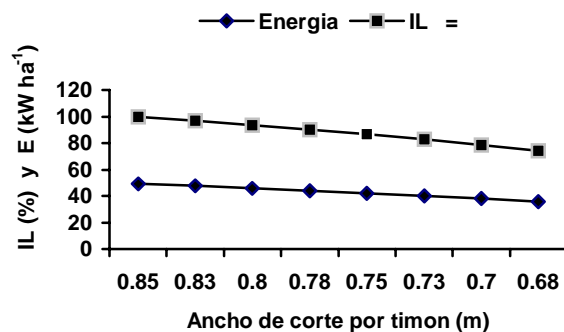


Figura 2. Valores predichos de la IL (%) y el RE (kW ha⁻¹) para diferentes anchos de corte del arado subsoleador.

En el Cuadro 2, se presentan los resultados de cada una de las ecuaciones que para cada tipo de implemento utilizado en este estudio, así como los valores de las variables consideradas, lo que permite realizar comparaciones entre los implementos e incluso simular variaciones para un mismo implemento.

CONCLUSIONES

- Los modelos aquí presentados pueden utilizarse como herramienta de soporte en la toma de decisiones para la operación y selección de implementos de labranza a usar en cada sistema de producción agrícola.
- Más que la profundidad de labranza, es su intensidad la que origina los incrementos del consumo energético, ya que está referida al volumen de suelo alterado por el implemento, los desniveles naturales que origina el mismo y la eficiencia con que sea realizado el trabajo.
- La intensidad de la labranza puede ser un buen indicador del grado de alteración causado al suelo, por efecto de los implementos agrícolas.
- Es necesario determinar la relación funcional que existe entre la intensidad de la labranza y el comportamiento de las propiedades físicas del suelo una vez preparado, de manera que se pueda predecir el comportamiento de dichas propiedades en función del implemento a utilizar para cada suelo y estado de humedad en particular.

- El sistema medidor de flujo, aquí presentado, permite determinar el consumo de combustible requerido únicamente durante la preparación del suelo al utilizarse implementos integrados al tractor, ya que se activa al bajar el implemento y se desactiva al levantarlo. Para implementos de tiro o para determinaciones en función del tiempo, es conveniente activar y desactivar manualmente este sistema.

LITERATURA CITADA

- Alberts, E.E., J.M. Laflen, W.J. Rawls, J.R. Simanton y M.A. Nearing. 1989. Soil component. USDA-ARS Report 2. National Soil Erosion Research Laboratory. W. Lafayette, IN.
- Hadas, A. y D. Wolf. 1983. Energy efficiency in tilling dry clod-forming soils. *Soil Tillage Res.* 3: 47-59.
- Martínez-Rubin, C.E. y J.F. Pissani Z. 1995. Efecto de la intensidad de labranza en el consumo energético. VI Congreso Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agropecuario. DGETA. Roque, Gto., México.
- Pla Sentis, I. y J.L. Russo. 1992. Manual de sistemas de labranza para América Latina. *Boletín de suelos FAO* 66 4: 9-20. Roma, Italia.
- Sheafer, R.L., C.E. Johnson, A.J. Koolen, S.C. Gupta y R. Horn. 1992. Future research needs in soil compaction. *Transaction of the ASAE* 35(6): 1761-1770.
- Torcasso, F. 1992. Manual de sistemas de labranza para América Latina. *Boletín de suelos de la FAO* 66. Labranza convencional o tradicional. Roma, Italia.