

RENDIMIENTO DE UN TRACTOR AGRÍCOLA EN FUNCIÓN DEL SISTEMA DE LABRANZA Y LA CARGA. II. CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y RESISTENCIA A LA RODADURA

Maiby Pérez¹

RESUMEN

La interacción de los parámetros de deslizamiento y rodadura con el suelo influye desfavorablemente en el aprovechamiento de la potencia del motor y en el consumo de combustible de los tractores, incidiendo sobre sus requerimientos energéticos. En este estudio, se evaluó la resistencia a la rodadura y el consumo de combustible de un tractor agrícola operando bajo diferentes condiciones de labranza (ocho niveles) y niveles de carga en la barra de tiro (tres niveles) en un diseño de parcelas grandes. Las cargas al tractor ensayo fueron aplicadas mediante el uso de un tractor freno. Las condiciones de labranza variaron desde labranza conservacionista hasta niveles moderados e intensos de mecanización. Un equipo de instrumentación permitió obtener el consumo horario (Ch) y específico de combustible (CEC) en cada prueba. Se determinaron la resistencia a la rodadura (Rk), el coeficiente de resistencia a la rodadura (k) y la eficiencia del rodamiento (η_k) utilizando un dinamómetro analógico. Los resultados mostraron que η_k no varió significativamente en las condiciones de labranza del ensayo y que tanto Rk como k se presentaron más altos en suelos muy labrados en comparación con los menos labrados. El Ch y CEC del tractor fueron excesivos, en general atribuido a la dificultad del tractor en superar la carga ejercida, y a los altos deslizamientos de la rueda, especialmente en los suelos intensamente labrados.

Palabras clave adicionales: Suelo, deslizamiento, labranza convencional, labranza conservacionista

ABSTRACT

Performance of an agricultural tractor as a function of tillage system and load. II. Fuel consumption and motion resistance

The interaction between wheel slip and motion resistance with the soil negatively affects the engine performance of agricultural tractors thus influencing their energy requirements. The objective of this trial was to determine the tractor motion resistance and fuel consumption under different tillage conditions (eight levels) and drawbar loads (three levels) in a layout of treatments in strip-plot. The load levels at drawbar of the test tractor were applied by a braking tractor at several gears combinations. The tillage conditions went from low-tillage to moderate and intensive conventional soil preparation. An electronic instrumentation allowed obtaining fuel consumption (Ch) and specific fuel consumption (CEC) data. Motion resistance (Rk), motion resistance coefficient (k) and motion resistance efficiency (η_k) were determined by using a clock dynamometer. The results showed that η_k did not vary under the soil tillage conditions, and that Rk as well as k were higher on intensive tillage conditions, followed by the low tillage soil condition. The Ch and CEC obtained were excessive being attributed to the difficulty of the tractor in overcoming the over load, and also to the high wheel slip values, especially on intensive tillage soils.

Additional key words: Soil, tractor slip, conventional tillage, low tillage

INTRODUCCIÓN

El desconocimiento de los parámetros de deslizamiento y rodadura, en la interacción con el suelo al realizar labores de tracción, influye desfavorablemente en el aprovechamiento de la potencia del motor y en el consumo de combustible de los tractores en el país, incidiendo

sobre los requerimientos energéticos de la labor agrícola que realizan. La resistencia a la rodadura y el rendimiento de combustible, asociados al comportamiento de la tracción de los tractores agrícolas deberían presentarse en valores que permitan satisfacer los requerimientos de tracción solicitados en cada labor, a la vez de mejorar la eficiencia tractiva y reducir la compactación

Recibido: Julio 25, 2005

Aceptado: Abril 21, 2006

¹ Instituto de Ingeniería Agrícola. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Apdo. 2101-4579. Maracay, Venezuela. e-mail: maiby_278@yahoo.com

del suelo.

La resistencia a la rodadura del tractor en un suelo está en función del hundimiento de las ruedas al desplazarse sobre él y constituye el descuento de una cierta parte de la fuerza tangencial que llega a la rueda necesaria para vencer la resistencia que opone el terreno al paso del tractor, que se calcula para evaluar la capacidad de tracción del tractor en forma aproximada (Márquez, 1990). La resistencia a la rodadura del tractor disminuye a medida que aumenta tanto la resistencia mecánica del suelo, como la sección del caucho y el radio de la rueda, y disminuye el peso del tractor, cuando se opera con neumáticos que deflecan en un 20% de la altura de la sección, y sobre suelos agrícolas que no se compactan excesivamente (Wismeir y Luth, 1974). Estos autores señalan además que, el coeficiente de resistencia a la rodadura disminuye cuando el peso adherente del tractor aumenta moderadamente mediante la adición de masas de lastre al tractor, en las situaciones en que se requiera para disminuir el deslizamiento, pero sin provocar un aumento marcado de la resistencia a la rodadura, que ocasionaría la reducción de la capacidad de tracción.

El valor de economía del combustible ($\text{kW}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$) muestra un máximo cada vez más alto a menores deslizamientos de la rueda, a medida que aumenta el índice de cono del suelo (Macnab et al., 1977) y el incremento de la eficiencia tractiva del tractor se corresponde con el descenso del consumo de combustible (Zoz, 1972; Zoz et al., 2002). Por esto es necesario predecir el comportamiento de estos factores en pruebas preliminares de tractores que cubran una amplia gama de condiciones de suelo en el país, entre las cuales se incluyan los sistemas conservacionistas que favorecen la presencia de cobertura y de raíces en el suelo.

De allí que el objetivo del presente estudio se orientó a determinar el efecto del incremento de la carga a la barra de tiro de un tractor agrícola de tracción simple y distintas condiciones de labranza del suelo sobre los parámetros de resistencia a la rodadura y consumo de combustible en un suelo de la serie Maracay.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los detalles metodológicos de esta

investigación aparecen señalados en una publicación previa (Pérez, 2006). En resumen, se utilizó un diseño estadístico de parcelas grandes considerando dos factores (condición de labranza con ocho niveles y carga en la barra de tiro con tres niveles) en un arreglo factorial 8×3 . Las cargas fueron aplicadas mediante el uso de un tractor-freno enganchado al tractor-ensayo, operando bajo tres combinaciones de marchas, identificadas como T-P (tercera-primera), S-P (segunda-primera) y C-T (cuarta-tercera) para el tractor ensayo y freno, respectivamente. Se conformaron ocho parcelas con diferentes sistemas de labranza. Las cuatro primeras representaron labranza conservacionista y estuvieron constituidas por barbecho (B), barbecho con cincel (BC), barbecho con un pase de rastra (B1) y barbecho con dos pases de rastra (B2). Las cuatro siguientes recibieron labranza convencional al inicio de las lluvias previo laboreo en barbecho y estuvieron constituidas por dos pases (2R), tres pases (3R), cuatro pases (4R) y cinco pases de rastra (5R), representando niveles de labranza del suelo desde moderados hasta intensivos.

El consumo horario (Ch) y específico de combustible (CEC) se obtuvieron usando un equipo de instrumentación (IROT-ETSIA-Madrid) constituido por un conjunto de sensores, acondicionador de señales, programa de adquisición de datos, computador personal y controlador de prestaciones para tractores que, a través de un caudalímetro (Gil, 1992), puede proporcionar lecturas y registros parciales y totales de Ch. Estos valores fueron convertidos luego en valores de CEC ($\text{g}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), usando para ello los valores de potencia del motor en cada prueba y el valor de la densidad gravimétrica del combustible diesel ($890 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). La medición de la resistencia a la rodadura (R_k) se hizo mediante un dinamómetro de reloj en pruebas en las que el tractor ensayo fue arrastrado por el tractor freno en las ocho franjas representativas de las diferentes condiciones de labranza del suelo (adyacentes a las parcelas grandes). Con el motor del tractor ensayo funcionando en mínimo y la caja de cambios en posición neutra, la R_k fue calculada como el promedio de la fuerza a la barra de tiro del tractor freno registrada a lo largo de la parte central de la franja de 60 m, aplicándose un factor de corrección para R_k debido al ángulo de

inclinación de la fuerza durante la prueba (Linares, 1996). Se determinó el peso dinámico del eje trasero de tracción ($R1y$), así como la fuerza tangencial de la rueda (FT) en cada prueba, aplicando las fórmulas reportadas por Linares (1996). El cálculo de k se hizo resolviendo $Rk/R1y$. La eficiencia a la rodadura (ηk) representa la fuerza consumida por efecto de rodadura en la fuerza tangencial (FT) que llega a la rueda se obtuvo dividiendo la tracción (Q) entre FT (Schlosser, 1996). La información respecto Q e índice de cono (IC), éste último como indicador de la dureza del suelo, fue tomada de Pérez (2006). Se realizó el análisis de varianza lineal con F aproximado y prueba de medias de Tukey. En el caso de las variables que no presentaron distribución normal o varianza homogénea se realizaron pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resistencia a la rodadura y coeficiente de resistencia a la rodadura del tractor

La comparación visual de los promedios mostrados en la Figura 1 indica que la Rk del tractor presentó valores más altos ($P \leq 0,05$) en los suelos muy labrados, posiblemente por efecto del mayor hundimiento de las ruedas del tractor en el suelo. La Rk mostró una tendencia en el orden siguiente: $5R > 4R = B1 > 2R = 3R > B2 = B > BC$.

Se detectaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre tratamientos (combinación condición de labranza y carga) con un efecto marcado de las condiciones de labranza sobre la resistencia a la rodadura (Cuadro 1), lo que permitió agrupar los valores de k en el orden siguiente: $5R = 4R = B1 = 3R = 2R > B = B2 = CB$. Así mismo, se observó una tendencia general del descenso de k con el incremento del IC del suelo (Figura 2), lo cual coincide con un aumento de la dureza del suelo y una disminución de la labranza con rastra. Esto concuerda con lo reseñado por Wismeir y Luth (1974) en relación a que k disminuye cuando se incrementa la dureza del suelo, así como con la sección y el diámetro de los neumáticos. Ortiz-Cañavate y Hernans (1989) reportan valores de k entre 0,06 y 0,1 para suelos agrícolas seco y húmedo, respectivamente. En este estudio los valores de k fueron cercanos a este rango tanto para las condiciones de suelos no

labrados ($BC, B, B1, B2$) con los mayores IC, Da, MS y CT (Pérez, 2006) como para aquellos con condiciones de mediana intensidad de labranza ($3R, 2R$), con valores intermedios de esos mismos parámetros.

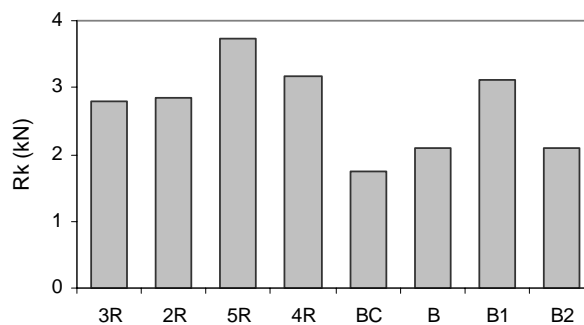


Figura 1. Resistencia media a la rodadura (Rk) del tractor en las diferentes condiciones de labranza. Separación de medias indica que $5R > 4R = B1 > 2R = 3R > B2 = B > BC$ de acuerdo a la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). Identificación de las siglas en la sección de materiales y métodos

El rendimiento por rodadura (ηk) no mostró diferencias muy notables entre los tratamientos (Cuadro 1), encontrándose varios grupos homogéneos de respuesta. Es posible observar una desviación del patrón general de ηk , especialmente en los suelos muy labrados ($5R$ y $4R$), donde se esperaban los menores valores de esta variable. Ello debido posiblemente a que la Q del tractor mostró un comportamiento inverso al supuesto, en relación a $R1y$ (Pérez, 2006), que no condujo al descenso de Q al ser afectada negativamente por mayores Rk y deslizamiento, en estas condiciones de suelo muy labrado con rastra.

Rendimiento en combustible

El consumo horario de combustible (Ch) del tractor bajo carga, en general, fue alto durante las pruebas (mayor de $16,51 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$), encontrándose diferencias significativas entre los tratamientos ($P \leq 0,05$) con tendencia a la conformación de un grupo homogéneo significativamente menor con el tractor marchando bajo la carga S-P en todas las condiciones de labranza (Figura 3a), exceptuando en $5R$, en la que la magnitud de la respuesta del consumo promedio se mostró siempre alta bajo cualquiera de las cargas (Figura 3b). Se observa

que el Ch del tractor no fue muy diferente bajo la influencia de las cargas T-S y C-T en cualquiera de las condiciones restantes. Así mismo, fue ligeramente superior en las condiciones 4R y 5R.

Cuadro 1. Valores promedio del coeficiente de resistencia a la rodadura (k) y del rendimiento de la rodadura (η_K) ante las diferentes condiciones de labranza y carga

Condición de labranza	Carga	$k = \frac{Rk}{Rl_y}$	η_K
3R	T-P	0,0720 abc	0,64 g
	S-P	0,0722 abc	0,65 g
	C-T	0,0732 abc	0,69 efg
2R	T-P	0,0772 ab	0,76 abcdef
	S-P	0,0738 abc	0,67 fg
	C-T	0,0737 abc	0,66 fg
5R	T-P	0,1011 a	0,70 defg
	S-P	0,1018 a	0,71 cdefg
	C-T	0,1037 a	0,74 abcdefg
4R	T-P	0,0866 a	0,74 abcdefg
	S-P	0,0856 a	0,72 bcdefg
	C-T	0,0894 a	0,78 abcde
BC	T-P	0,0461 c	0,79 abcd
	S-P	0,0459 c	0,78 abcd
	C-T	0,0461 c	0,79 abcd
B	T-P	0,0559 bc	0,76 abcdef
	S-P	0,0552 bc	0,74 abcdefg
	C-T	0,0554 bc	0,74 abcdefg
B1	T-P	0,0816 ab	0,66 fg
	S-P	0,0850 ab	0,75 abcdefg
	C-T	0,0850 ab	0,74 abcdefg
B2	T-P	0,0568 bc	0,80 abc
	S-P	0,0570 bc	0,81 ab
	C-T	0,0584 bc	0,83 a

Valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes según la prueba de Kruskal-Wallis ($P \leq 0,05$). Identificación de las siglas en la sección de materiales y métodos

El consumo específico de combustible (CEC) se mostró excesivo en todas las pruebas (muy bajo rendimiento de combustible), siendo superior a $630 \text{ g} \cdot \text{Kw}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (Figura 4), lo cual fue atribuido a que el régimen del motor bajó notablemente durante el trabajo en carga en la mayoría de los casos. Hubo un efecto significativo ($P \leq 0,05$) de las cargas sobre el CCE, siendo superior en la carga S-P en la mayoría de las condiciones de labranza posiblemente por la caída sensible del régimen del motor en esta condición de trabajo y a

los altos deslizamientos que se han encontrado en estas condiciones (Pérez, 2006). Esto originó en S-P el más bajo rendimiento del combustible y en C-T el mayor en cualquiera de las condiciones, con respuestas más satisfactorias en los suelos con mayores IC, Da, MS y CT (B, BC, B2 y B1) donde los deslizamientos de la rueda han sido menores.

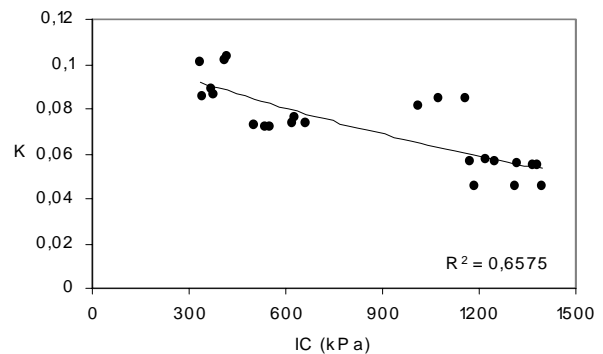


Figura 2. Coeficiente de resistencia al rodamiento del tractor (k) en función del índice de cono del suelo (IC)

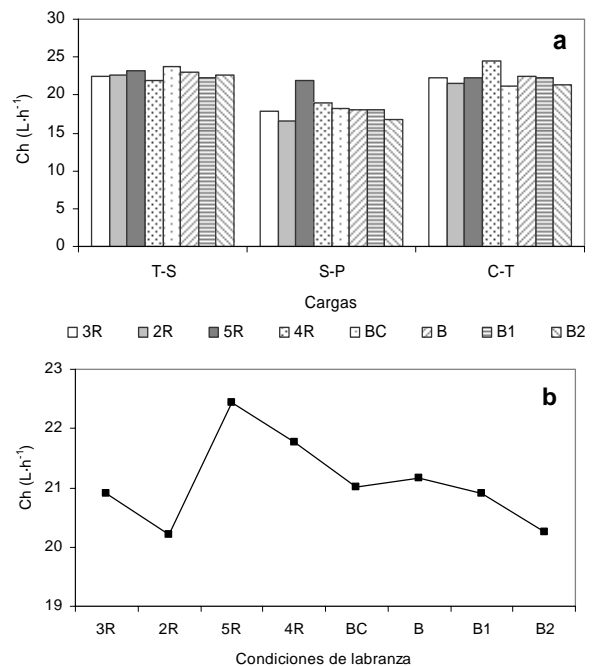


Figura 3. a) Consumo horario de combustible (Ch) del tractor para los diferentes tratamientos del ensayo y b) consumo promedio para las ocho condiciones de labranza. Diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Kruskal-Wallis ($P \leq 0,05$). Identificación de las siglas en la sección de

materiales y métodos

Macnab et al. (1977) mencionan que la mayor economía en el consumo de combustible del tractor en carga se obtiene en suelos resistentes a bajos deslizamientos del tractor, señalando además, que en suelos más firmes es posible incrementar el tiro hasta un 30% mediante el aumento del deslizamiento hasta el punto de máxima economía del combustible (15-20%), dado que el valor de eficiencia de tracción cambia muy poco y se mantiene aún elevado en ese punto.

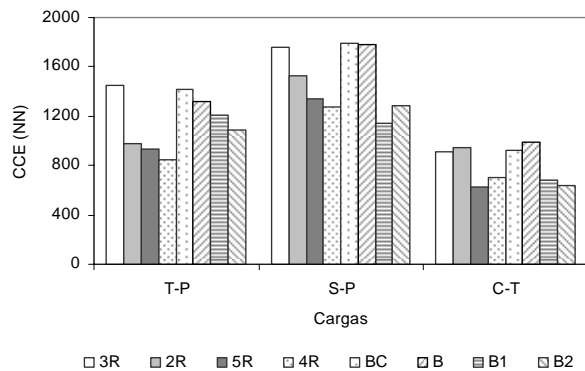
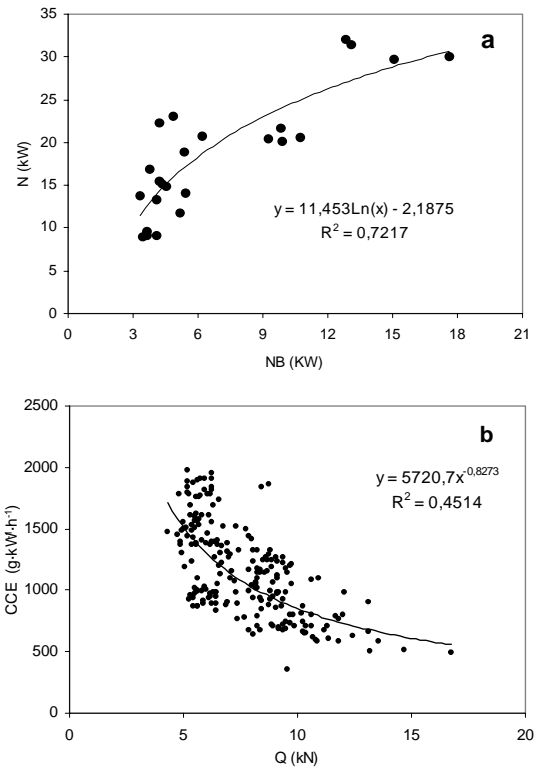


Figura 4. Consumo específico de combustible (CCE) del tractor en función de las condiciones de labranza y cargas en la barra de tiro. Diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre las cargas según la prueba de Kruskal-Wallis. Identificación de las siglas en la sección de materiales y métodos

El comportamiento general del CEC (Figura 5a) mostró descensos con el aumento de la tracción resultante (Q) debido a que la potencia del motor estuvo influenciada marcadamente por la potencia a la barra de tiro, que a su vez aumentó en forma directa con el aumento de la Q del tractor (Figura 5b).

Lo anterior permitiría explicar por qué en los suelos muy labrados 4R y 5R, donde resultó mayor la tracción (Q), posiblemente por efecto del tiro inclinado hacia arriba y por la pérdida del peso dinámico en el eje trasero referido por Pérez (2006), el CEC fue también el más bajo de las distintas condiciones, a pesar de los mayores deslizamientos, resistencia a la rodadura y muy baja eficiencia de tracción del tractor, que indicaban un mayor CEC en estas condiciones, según lo reporta el mismo autor. Se evidencia que

el comportamiento del CEC estuvo en general por encima de los valores adecuados de economía del combustible en todas las pruebas involucradas en el ensayo, debido muy posiblemente a los altos deslizamientos de las ruedas.



Figuras 5. Consumo específico de combustible (CCE) en función de a) la tracción resultante (Q) y b) potencia del motor (N) en relación con la potencia a la barra de tiro (NB) del tractor en las condiciones promedio del ensayo

CONCLUSIONES

Los valores de resistencia a la rodadura y del coeficiente de resistencia a la rodadura del tractor se presentaron más altos en suelos muy labrados seguidos por los suelos con menor intensidad de labranza, en relación directa con el IC del suelo.

Los consumos de combustible horario y específico del tractor fueron excesivos en todas las pruebas, lo cual fue atribuido a la dificultad del tractor en superar la carga ejercida, y posiblemente en respuesta al bajo nivel de utilización del motor y altos deslizamientos de la

rueda obtenidos de manera general en las condiciones de las pruebas.

LITERATURA CITADA

1. Gil, J. 1992. Ensayo en campo de tractores y operaciones mecanizadas. Revista Máquinas y Tractores 6:35-40.
2. Linares, P. 1996. Teoría de la tracción de tractores agrícolas. E.T.S. Ingenieros Agrónomos de Madrid. 157 p.
3. Macnab, J.E., R.B. Wensink y D.E. Booster. 1977. Modeling wheel tractor energy requirement and tractive performance. Transactions of the ASAE 20(4): 602-605.
4. Márquez, L. 1990. Laboreo-Solotractor'90. Editorial Laboreo. Madrid. 231 p.
5. Ortiz-Cañavate, J. y J.L. Hernans. 1989. Técnica de la Mecanización Agraria. Ediciones MundiPrensa. Madrid.
6. Pérez, M. 2006. Rendimiento de un tractor agrícola en función del sistema de labranza y la carga. I. Características de la tracción. Bioagro 18(1): 49-56.
7. Schlosser, F. 1996. Influencia del avance cinemático de las ruedas delanteras motoras y la eficiencia de la tracción de los tractores agrícolas. Tesis. E.T.S. Ingenieros Agrónomos de Madrid. 286 p
8. Wismeir, R.D. y H.J. Luth. 1974. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. Trans. ASAE 17:8-10.
9. Zoz, F.M. 1972. Predicting tractor field performance. Transactions of the ASAE. 15(2):249-255.
10. Zoz, F. M., R. J. Turner y L. R. Shell. 2002. Power delivery efficiency: a valid measure of belt and tire tractor performance. Transactions of the ASAE 45 (3):509-551.