

IMPACTO DE LA LABRANZA EN EL FLUJO ENERGÉTICO DE UN SUELO ARCILLOSO

Impact of Tillage on the Energy Flux of a Clayish Soil

Armando López Santos^{1‡}, Alejandro Zermeño González², Martín Cadena Zapata³, José A. Gil Marín⁴, Eladio Cornejo Oviedo⁵ y Mario S. Ríos Camey⁴

RESUMEN

Pese a que las prácticas de labranza tienen un efecto directo sobre el flujo de calor en el suelo (G), éstas no se han valorado debidamente. De los componentes del balance de energía [$BE = (H + LE) / (Rn-G)$], G es una variable que expresa la cantidad de energía que puede ser liberada o almacenada en el suelo, y la diferencia $Rn-G$ representa la energía disponible en la superficie que puede transformarse en flujo de vapor de agua (LE) y en flujo de calor sensible (H). La evaluación de G, para suelo desnudo (Gbsup) y cubierto con vegetación (Gvsup), forma parte de un estudio basado en el método eddy covariance, efectuado en el 2006 (octubre-diciembre), en el rancho “Los Ángeles”, municipio de Saltillo, Coah., México, donde el clima es del tipo BWhw(x')(e) y los suelos del lugar son del tipo Feozem lúvico (HI). El efecto de la labranza convencional (LC) y labranza vertical (LV) se comparó con un suelo no disturbado (NL). Los resultados del análisis estadístico indican diferencias altamente significativas ($\alpha = 0.01$) entre los diferentes tipos de labranza. En particular, se observó que LV disminuyó entre 20 y 38%, tanto la magnitud del flujo energético en la superficie, como la capacidad absoluta de retener y almacenar energía en la capa de suelo a 8 cm de profundidad, comportamiento que también es representado mediante un modelo de regresión lineal para Gbsup y Gvsup.

Palabras clave: flujo de calor en el suelo, métodos micrometeorológicos, prácticas de labranza.

¹ URUZA-Universidad Autónoma Chapingo. Bermejillo, Durango, México.

[‡] Autor responsable (alopez@chapingo.uruza.edu.mx)

² Departamento de Riego y Drenaje, ³ Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, ⁴ Programa ISP, ⁵ Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Recibido: julio de 2007. Aceptado: mayo de 2008.
Publicado en Terra Latinoamericana 26: 203-213.

SUMMARY

Although tillage practices have a direct impact on soil heat flux (G), they have not been properly valued. G is a parameter of the energy balance components [$BE = (H + LE) / (Rn-G)$] that indicate the amount of energy that can be released or stored in the soil. The subtraction $Rn-G$ represents the energy available on the surface that can be transformed into water flux vapor (LS) and perceptible heat flux (H). The evaluation of G, for bare soil (Gbsup) and soil covered with vegetation (Gvsup), is part of a study based on the eddy covariance method, that started in 2006 (October-December), at the ranch “Los Angeles” in Saltillo, Coahuila, Mexico, where climate type is BWhw(x')(e) and the soils are classed as Luvic Feozem (HI). The effect of conventional tillage by disc plowing (CT) and vertical tillage (VT) was compared with a non-disturbed soil (NT). The results of the statistical analysis suggest highly significant differences ($\alpha = 0.01$) between types of tillage. In particular, it was noted that VT decreased from 20 to 38% both the magnitude of the energy flow at the surface and the absolute ability to retain and store energy in the soil layer at a depth of 8 cm. This behavior is also represented by a linear regression model for Gbsup and Gvsup.

Index words: soil heat flux, micrometeorological methods, tillage practices.

INTRODUCCIÓN

A pesar de que el flujo de calor en el suelo (G) es una variable afectada por las prácticas de labranza, éste se ha valorado marginalmente bajo un enfoque energético (Noborio *et al.*, 1996; Drury *et al.*, 1999). La capacidad calórica (Cs) y la conductividad térmica (K) determinan cuánto se calienta o enfría un suelo con los cambios de flujo de calor mediante conducción, convección y radiación (Ochsner *et al.*, 2001).

Lo anterior adquiere relevancia al considerar el reporte del 'Intergovernmental Panel on Climate Change' (IPCC, 2007), sobre los cambios de temperatura en los sistemas físicos y biológicos entre 1970 y 2004, en el mundo. En este reporte se indica que en el norte centro, noroeste e incipientemente en el noreste del territorio mexicano, dichos cambios se estiman entre 1 y 2 °C; fluctuación que ya se había advertido (UACH-CONAZA-SEDESOL-SAGARPA, 2004) como un factor que contribuye en marcadas irregularidades hídricas con una fuerte tendencia a la sequía y a la desertización, cuyos estragos se manifiestan más dramáticamente en las regiones agrícolas. Debido en parte a esto, en años recientes ha resurgido el interés en las mediciones de radiación y el balance de energía en el suelo y en el dosel de las plantas, pero pocas publicaciones se han enfocado al estudio sobre la relación entre las propiedades térmicas y las fracciones de volumen de las fases del suelo (Ham y Heilman, 2003; Ochsner *et al.*, 2006; 2007; Hatfield *et al.*, 2007; Sauer y Pinter, 2007).

Sin duda, aún hay mucho que hacer para mejorar la comprensión respecto a la dinámica de transferencia de agua, energía y gases traza de la superficie de la tierra. Por ejemplo, tradicionalmente se ha pensado que las propiedades térmicas del suelo están fuertemente afectadas por el contenido de agua (θ) en el suelo y, por lo tanto, se asume que la habilidad para medir K y θ es una importante herramienta en el manejo del régimen de temperatura para la germinación, el desarrollo y la productividad del cultivo (Elias *et al.*, 2004; Lipiec *et al.*, 2006).

Al respecto, en una perspectiva distinta, Ochsner *et al.* (2001) estudiaron la relación entre las mediciones térmicas del suelo y las fracciones líquida, sólida y gaseosa de cuatro suelos (franco arenoso, franco arcilloso, limo arcilloso y franco limo-arcilloso), cuyo contenido máximo de arcilla fue de 32%. Dichos autores encontraron un efecto dominante de la fracción gaseosa sobre la líquida y sólida.

La evaluación de G en condiciones de suelo desnudo (G_{bsup}) y cubierto con vegetación (G_{vsup}) forma parte de un estudio basado en el método eddy covariance, el cual está orientado, entre otras cosas, a la búsqueda del manejo sustentable del suelo. Con base en lo anterior, para efectos del presente trabajo, G es evaluado en términos de su comportamiento por efecto de la labranza vertical (LV) y la labranza convencional (LC); partiendo del hecho de que LV es una práctica que consiste en

el empleo de una herramienta que utiliza brazos o flejes equipados con puntas para aflojar el suelo sin invertirlo, en tanto que LC implica el uso de un arado de discos que tiene como característica principal que éste invierte la capa de suelo trabajado. En general, la profundidad de operación de ambos implementos es entre 25 y 30 cm (Cadena-Zapata *et al.*, 2004).

Los objetivos particulares de la presente investigación fueron: i) explicar el comportamiento del flujo de calor en el suelo (G) bajo dos sistemas de labranza, vertical (LV) y convencional (LC), en un suelo arcilloso del noreste de México; y ii) evaluar el impacto de estos dos sistemas de labranza en el comportamiento del flujo energético en el suelo, comparándolo en una condición de suelo no disturbado (NL).

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se condujo en el otoño de 2006 en el rancho "Los Ángeles", municipio de Saltillo, Coah., México (25° 6.650' N y 100° 59.413 O), con una altitud promedio de 2100 m. El clima del lugar, de acuerdo con García (1975), es [BWhw(x')(e)] semiárido, con invierno fresco, con temperatura media anual que fluctúa entre 18 y 22 °C, con lluvias promedio anual de 450 a 550 mm, distribuidas primordialmente en verano e invierno.

Por otro lado, con base en el estudio de digitalización realizado, a partir de la referencia cartográfica del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 1976) y corroboraciones de campo, se encontró que la vegetación tiene una distribución que se relaciona con las características topográficas del lugar. Por ejemplo, en la planicie dominada por suelo aluviales predominan los pastizales naturales combinados con matorral inerme; en las laderas de la sierra predomina la vegetación de matorral rosetófilo espinoso asociado con Izotal; y, por último, en las partes altas de la sierra predomina la vegetación de pino con matorral inerme. Asimismo, se encontró que de los grupos definidos por la World Reference Base (FAO-ISRIC-ISSS-AISS-IBG, 1994) los Luvisoles ocupan en las planicies 40% de la superficie total y se caracterizan por ser profundos, con un horizonte superficial de color oscuro y rico en materia orgánica (MO), y los Leptosoles 60% de la superficie restante, los cuales se encuentran en la serranía compuesta por laderas y mesetas, con presencia de afloramiento rocoso y una capa delgada de suelo;

éstos son los más susceptibles a la erosión y, además, en la parte alta de la sierra se encuentran suelos forestales de formación *in situ* ricos en MO y humus.

El método eddy covariance permite la estimación del balance de energía en la superficie en condiciones de advección significativas y la confiabilidad de sus mediciones se establece a partir de la evaluación de los componentes más importantes en términos energéticos (Kizer y Elliott, 1991; Clark *et al.*, 2001). Por lo que, debido a que las magnitudes tan pequeñas que alcanza la energía almacenada en la capa de aire entre la superficie del suelo y el dosel de la planta (S) y la energía requerida en el proceso fotosintético (PH), en la ecuación del balance de energía ($R_n = H + LE + G + S + PH$), S y PH se eliminan, quedando dicha evaluación de la siguiente manera:

$$[R_n - G] = [H + LE] \quad (1)$$

Los dos componentes de la izquierda indicados por $[R_n - G]$ representan la energía disponible en la superficie del suelo, la cual se transforma, de acuerdo con la ley de la conservación de la energía, en los dos componentes de la derecha $[H + LE]$, que es la energía en la capa de aire que se localiza sobre la superficie del suelo. Ham y Heilman (2003) emplearon el balance energético (BE) para indicar la precisión de las mediciones, el cual debe ser casi igual a la unidad; incluso estos autores señalan que valores de 0.7 a 0.82 pueden indicar buenas índices para la ecuación:

$$BE = [R_n - G] / [H + LE] \quad (2)$$

De tal manera que si BE se ajusta bajo el criterio de que $[R_n - G]$ es un término muy confiable comparado con $[H + LE]$ y que, además de esto, G es una variable que se mide continua e independiente de las condiciones de advección prevaletientes sobre la superficie, entonces es válido analizar, de manera independiente,

el comportamiento de G, ya sea para mejorar la comprensión sobre la dinámica de transferencia de agua, energía y gases traza de la superficie de la tierra, o simplemente para evitar errores de estimación en la medición del balance de energía (Massman y Lee, 2002; Ochsner *et al.*, 2007).

En particular, para explicar el comportamiento de la energía que fluye en el suelo, en este caso, se recurre a la ley de conducción de calor o ley Fourier, utilizada por varios autores (Ochsner *et al.*, 2001; 2007; Deru, 2003), en la cual se establece que “el calor transmitido es directamente proporcional al salto de temperatura a través de una masa (como una pared), e inversamente proporcional al espesor de la misma.”

Una interpretación de lo anterior permite definir a G como el calor transmitido a través de la superficie λ , especificada como conductividad térmica ($m^2 s^{-1}$), el cual se asume con un valor constante de acuerdo con las características del suelo; y $\Delta T / \Delta z$ representa al gradiente vertical de temperatura, cuya ecuación se presenta a continuación:

$$G = \lambda \cdot \Delta T / \Delta z \quad (3)$$

Para aplicar la ecuación anterior es necesario implantar condiciones de frontera para la masa de suelo. Para ello, en la Figura 1 se representa el comportamiento de G, que puede ser ascendente y descendente entre los límites $z = 0$ y $z = D$. Cuando el valor de G es positivo, esto significa que el suelo gana energía y, por el contrario, cuando presenta valores negativos se interpreta como pérdida de energía.

El almacenamiento de la energía en la capa de suelo a 8 cm de profundidad, definido en la Figura 1 como ΔS , está dado por la diferencia entre el flujo de calor en la superficie (G_0) y el flujo de calor a 8 cm (G_{D8}), cuya expresión algebraica se representa de la siguiente manera:

$$\Delta S = G_0 - G_{D8} \quad (4)$$

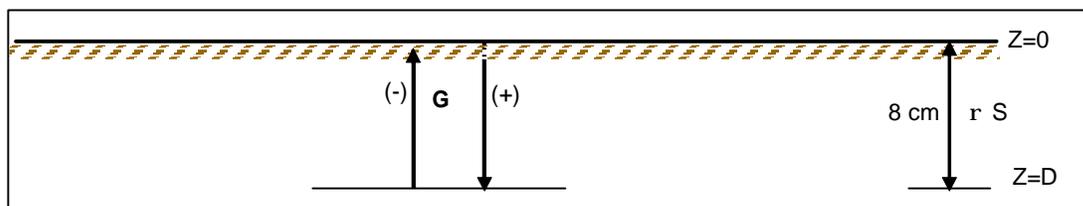


Figura 1. Representación esquemática de las condiciones de frontera para el análisis del flujo energético en el suelo.

G_{D8} es una magnitud que se obtiene por medio de los sensores; sin embargo, para poder calcular G_0 es necesario determinar analíticamente ΔS . De acuerdo con lo propuesto por Ochsner *et al.* (2007), esto significa que la energía que fluye tanto en forma ascendente como descendente es igual a la integral en los límites $z = 0$ hasta $z = D$, del gradiente vertical de energía que está afectado por el producto de la densidad aparente del suelo (Da), las propiedades térmicas del suelo (Cs) y los cambios de temperatura (T), como una función del espesor de la capa de suelo (dz), mismo que está representado en la ecuación:

$$r S = \int_{z=0}^{z=D} \frac{\delta}{\delta t} \left[Da \cdot Cs \cdot T \right] dz \quad (5)$$

La solución analítica de la Ecuación 5 se presenta a continuación:

$$\Delta S = (Da \cdot Cs \cdot \Delta T \Delta z) / \Delta t \quad (6)$$

Además de lo anterior, es importante hacer notar que Cs es una variable que está afectada por el contenido de agua en la capa de suelo; ΔT es la diferencia en la temperatura de un tiempo desde $t = 0$ a $t = T$; Δz es la diferencia en profundidad del suelo desde $z = 0$ hasta $z = D$ y Δt representa el tiempo que transcurre entre dos lecturas consecutivas de $t = 0$ hasta $t = t$.

Además del criterio de confiabilidad anteriormente expuesto, respecto a las mediciones de G y R_n , es importante señalar que éstas se realizaron en una fracción de 35 ha. Ahí se definieron tres parcelas de 2.4 ha cada una, las cuales mostraron características edáficas y de vegetación similar, cada una con una longitud de 120 m en su dirección N-S y 200 m en dirección E-O, donde se estudiaron los horizontes de diagnóstico en las profundidades 0-30 y 30-60 cm. Los análisis de laboratorio y campo más sobresalientes son: textura arcillosa, > 40% (hidrómetro de Bouyoucos); pH > 8 (potenciómetro); color en la superficie del suelo seco 10YR 5/2 (tablas Munsell) y contenido de carbonatos totales > 37% (volumetría de neutralización); y tomando como base la metodología de identificación del INEGI (2001), se deduce que el tipo de suelo corresponde a un Feozem lúvico (Hl) (INEGI 1976; FAO-ISRIC-ISSS-AISS-IBG, 1994).

Longitud del Estudio y Variables de Respuesta Medidas y Estimadas

Las mediciones se realizaron entre los días del año (DDA) 293 y 352 de 2006. Para NL éstas se hicieron durante 21 días, abarcando los DDA del 293 al 314; para continuar con el tratamiento LV por espacio de 18 días entre los DDA 314 al 332; y concluir con LC con una duración de 27 días comprendiendo los DDA del 332 al 352. R_n y G , por ser parte de un estudio de balance energético, fueron medidas en $W m^{-2}$. Para R_n se utilizó un radiómetro neto (modelo NR-LITE, Kipp & Zonen) y G se midió para dos condiciones de suelo: protegido con vegetación (G_{vsup}) y desnudo (G_{bsup}); cada sistema incluyó un plato para medir flujo de calor (modelo HFT3, REBS, Inc.), colocado a 8 cm de profundidad y, de manera contigua, dos termopares de cuatro puntas para medir temperatura del suelo, en °C (modelo TCAV, Campbell Scientific), que se instalaron a 2 y 6 cm de profundidad.

Además, para medir el contenido de humedad se tomaron muestras de suelo a 5 cm de profundidad con una barrena Veihmeyer, para diferentes DDA y su contenido volumétrico (θ_w) fue estimado por gravimetría (299-314, $\theta_w = 0.1876$; 325, $\theta_w = 0.1886$; 332, $\theta_w = 0.1001$; 339, $\theta_w = 0.1088$; y 352, $\theta_w = 0.1459$); y la densidad aparente del suelo (Da) se midió utilizando una barrena de núcleos, cuyos valores para NL, LV y LC fueron 900, 916 y 1000 $kg m^{-3}$, respectivamente.

Variables Medidas y Estimadas

Con base en estos datos y considerando un valor estándar de la capacidad calórica de los minerales ($C_d = 840 J kg^{-1} K^{-1}$) y la capacidad calórica del agua ($C_w = 4190 J kg^{-1} K^{-1}$) como constantes en la estimación del flujo de calor en la superficie, tanto para G_{vsup} , como para G_{bsup} , se sustituye la Ecuación 6 en la 4, quedando de la siguiente manera:

$$G_{s_x} = G_{D8} + \frac{[(C_d + \theta_w \cdot C_w) Da \cdot \Delta T \cdot \Delta z]}{\Delta t} \quad (7)$$

donde: G_{s_x} puede ser G_{vsup} o G_{bsup} , en $W m^{-2}$; G_{D8} es el flujo de calor medido con el sensor a 8 cm de profundidad, también en $W m^{-2}$; ΔT es el cambio de la temperatura promediada por los sensores desde 2 hasta 6 cm de profundidad, en °C; Δz es la profundidad a la que el plato de flujo de calor es colocado, cuyo valor en

la ecuación es de 0.08 m; y Δt es una variación del tiempo en segundos (20 x 60).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Selección de Datos con Base en Días Típicos

Para disminuir la variabilidad de los datos relativos a R_n y G se optó por seleccionar días típicos de la época de otoño, que corresponden a cielos despejados, en los que se distinguen dos periodos para R_n : el primero, con una máxima de 573 $W m^{-2}$ y, el segundo, de 442 $W m^{-2}$. De tal manera que de los 66 días que comprendió la medición, se dejaron sólo 24 de los 30 días que presentaron esta misma condición. En ese sentido, los DDA seleccionados para cada tratamiento fueron de 8 para cada uno, cuya distribución se muestra en las Figuras 2a,b y 3.

Después de definir la longitud para el análisis estadístico, se hizo una evaluación de normalidad con los valores absolutos, para disminuir dispersión y poder utilizar la forma $x^{1/2}$, de las variables de respuesta ya indicadas (G_{v8cm} , G_{b8cm} , G_{vsup} y G_{bsup}), así como los valores positivos de R_n . Los resultados de dicha prueba indican que la variable transformada en la forma ya indicada (raíz de x), presenta una distribución normal con un nivel de significancia estadística de 0.01. Posteriormente, con los valores absolutos de las variables estudiadas se hizo una prueba de comparación de medias por el método TTEST (Rebolledo-Robles, 2002; SAS Institute, 2006), el cual se basa en asumir que las varianzas de dos grupos de datos son iguales ($\sigma^2 = \sigma^2$). Esta prueba se estableció considerando únicamente como fuente de variación a los tratamientos y un nivel de significancia estadística de 0.01.

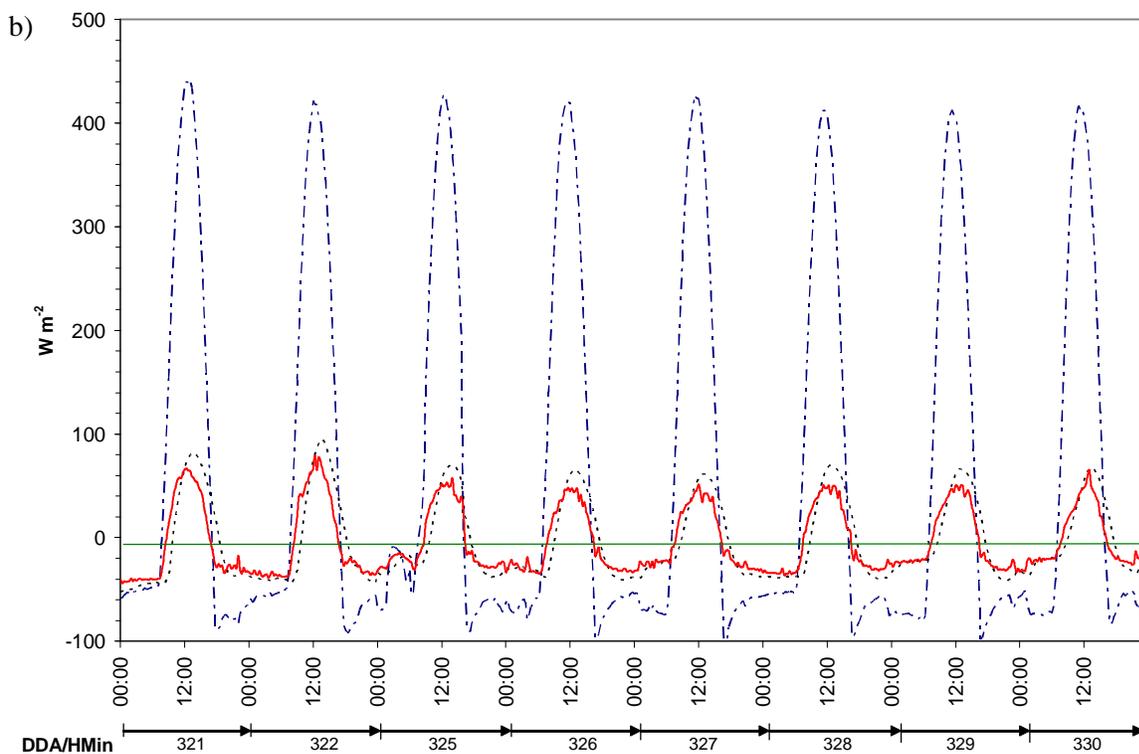
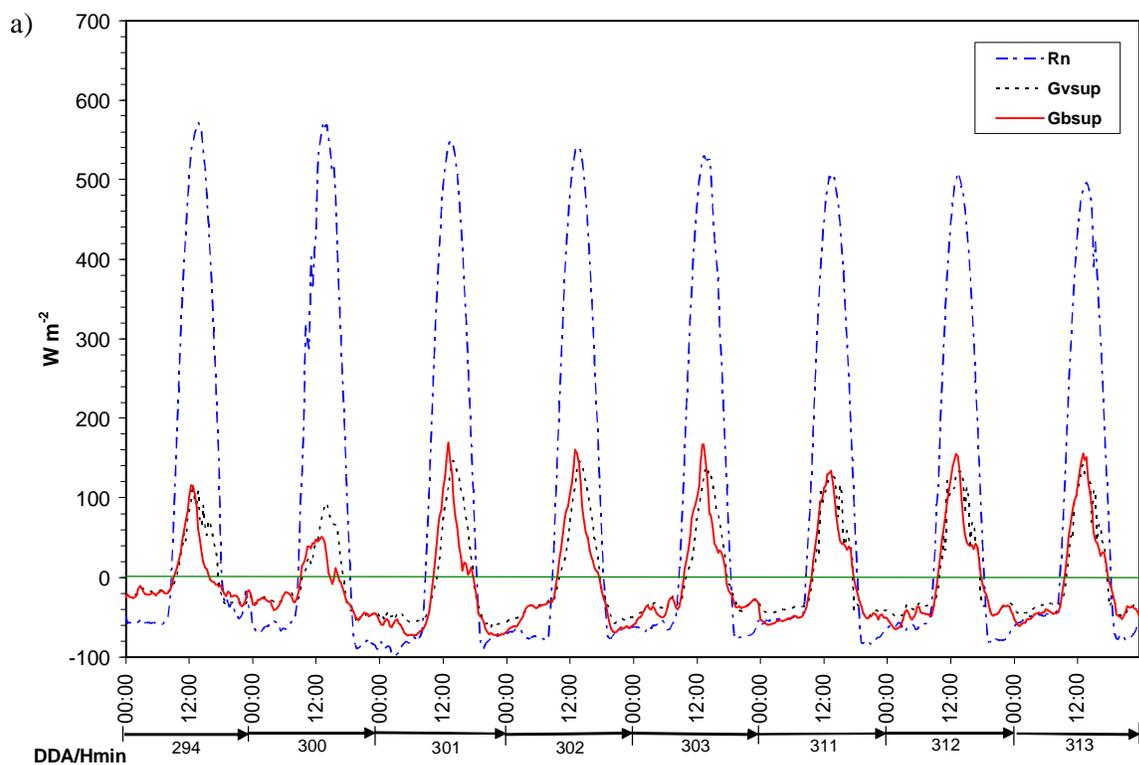
Comportamiento de R_n y G

El comportamiento de R_n y G_{D8} para cada tratamiento proviene de los valores instantáneos obtenidos directamente por los sensores ya descritos. Las Figuras 2, 3, 4 y 5 ilustran el comportamiento de R_n y G_x , mediante una línea discontinua para la primera, así como para G_{vsup} con una línea punteada y G_{bsup} con una línea continua. Este fenómeno, por lo tanto, corresponde a los cambios energéticos en la capa de suelo en el espesor definido a 8 cm, mismos que son calculados para la superficie con base en la Ecuación 7, cuya descripción es la siguiente:

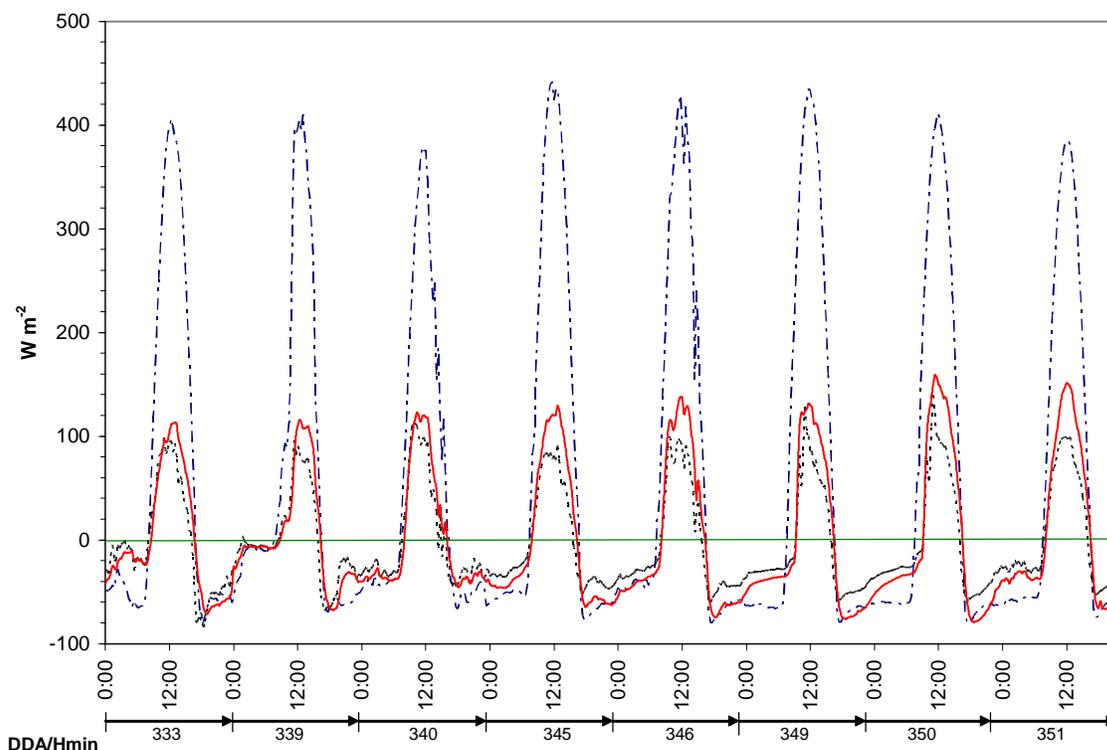
1) En las condiciones del tratamiento NL (Figura 2a), cuando R_n se encuentra en un intervalo entre -98 y 572 $W m^{-2}$ y su valor promedio es de 98 $W m^{-2}$, el comportamiento del flujo energético para ambas condiciones de suelo tiende a ser diferente; aunque, para G_{bsup} es evidente una mayor sensibilidad que en el suelo que está protegido con vegetación (G_{vsup}). Es decir, mientras que G_{bsup} alcanza sus valores máximos a las 13:00 h en G_{vsup} ocurre alrededor de las 14:00 h, debido a que cuando el mínimo y el máximo de G_{bsup} están entre -73 y 169 $W m^{-2}$, para G_{vsup} el rango está entre -64 y 146 $W m^{-2}$, lo cual representa una diferencia de 20 y 9 $W m^{-2}$ para el máximo y el mínimo, respectivamente.

2) Para el tratamiento LV (Figura 2b), cuando el intervalo de R_n está entre -98 y 442 y su promedio es de 73 $W m^{-2}$, G_x muestra un comportamiento con fluctuaciones marcadas y opuesto a lo ocurrido con el NL, tanto en los tiempos de ocurrencia como para los valores máximos de flujo energético. Aunque la ocurrencia de los valores máximos para ambas condiciones de suelo se adelanta aproximadamente una hora, las fluctuaciones sólo se presentan para G_{bsup} mediante cambios repentinos en el sentido en las curvas, tanto para valores diurnos como nocturnos. Los promedios mínimos y máximos también contrastan con NL; entre ambas condiciones, por ejemplo, cuando en G_{bsup} están entre -25 y 22 $W m^{-2}$, en G_{vsup} el intervalo es de -53 y 95 $W m^{-2}$, lo cual representa una diferencia de 73 y 28 $W m^{-2}$ para el máximo y el mínimo, respectivamente.

3) Para LC (Figura 3), cuando el intervalo de R_n está entre -83 y 442 y su promedio fue de 60 $W m^{-2}$ (igual al que se registró en LV), se observa que tiene un comportamiento muy parecido a NL y, por lo tanto, opuesto a LV. Es importante notar que los intervalos entre las variables observadas son más grandes, esto posiblemente debido a una mayor sensibilidad de G_{bsup} al efecto de la radiación, pues sus valores máximos están entre 100 y 160 $W m^{-2}$, seguido de G_{vsup} en el que los valores máximos están entre 90 y 140 $W m^{-2}$, cuyo tiempo de ocurrencia máxima en ambos se da alrededor de las 12:00 h. Además, hay que agregar que los promedios mínimos y máximos también contrastan con el tratamiento anterior, entre ambas condiciones; por ejemplo, cuando en G_{bsup} está entre -79 y 159 $W m^{-2}$ para G_{vup} el intervalo es de -84 y 139 $W m^{-2}$, lo cual representa una diferencia de 20 y 5 $W m^{-2}$, para el máximo y el mínimo, respectivamente.



Figuras 2. Radiación neta (Rn) y flujo de calor en suelo desnudo (Gbsup) y protegido con vegetación (Gvsup) en la superficie para 24 días típicos de otoño que corresponden a (a) suelo no disturbado (NL), (b) labranza vertical (LV).



Figuras 3. Radiación neta (Rn) y flujo de calor en suelo desnudo (Gbsup) y protegido con vegetación (Gvsup) en la superficie para 24 días típicos de otoño que corresponden a labranza convencional (LC).

Evaluación de Impacto

Para complementar la descripción anterior, en la Figura 4 se presenta una comparación de los coeficientes de variación asociados a los tratamientos, tanto para G_x como para G_{D8} . Esta comparación permite observar que la variabilidad en LC es menor que en LV, incluso contrasta Gbsup en el tratamiento LC por insignificante (0.01%). Del mismo modo, es importante señalar que el flujo energético a 8 cm de profundidad en ambos casos (Gv8cm y Gb8cm) presenta las variabilidades más altas por ser de 26.6 y 35.0%, respectivamente. En otras palabras, este comportamiento indica que LV produce una mayor variabilidad en el flujo de calor en el suelo que LC. Esto puede deberse a que el implemento provoca un incremento en el volumen de suelo y una disminución en el contenido de humedad, lo cual es consistente con lo mencionado por Ochsner *et al.* (2001).

Asimismo, los resultados del TTEST de las tres comparaciones al nivel de significancia estadística de 0.01 indica que entre el NL y LV la diferencia es altamente significativa para los valores absolutos de las cuatro

variables estudiadas; en la segunda comparación realizada entre NL y LC se observan diferencias significativas para las variables Gv8cm y Gvsup; y por último, para la comparación realizada entre LV y LC se detectaron diferencias para las variables Gb8cm, Gvsup y Gbsup. Esto significa que el suelo desnudo, si bien gana calor rápidamente, no es capaz de retenerlo o almacenarlo por mucho tiempo, pues al analizar los valores integrados G_x , en términos reales, disminuye su capacidad de almacenar energía en 40 y 60% con respecto a LC y NL, respectivamente; comportamiento que se aproxima a lo reportado por Ochsner *et al.* (2007).

Para aclarar lo anterior, en el Cuadro 1 se muestran las magnitudes absolutas promedio diarias que caracterizan el comportamiento de la energía, en $kW m^{-2}$, que teóricamente es almacenada en la capa de suelo a 8 cm de profundidad ($\Delta S = G_x - G_{D8}$), siendo el mismo tipo de suelo bajo los dos sistemas de labranza empleados con respecto a NL; los índices G_x/R_n que representan la proporción en que Rn es convertida a G_x ; así como la diferencia $R_n - G_x$, que representa la energía disponible en la superficie del suelo que podría ser convertida a

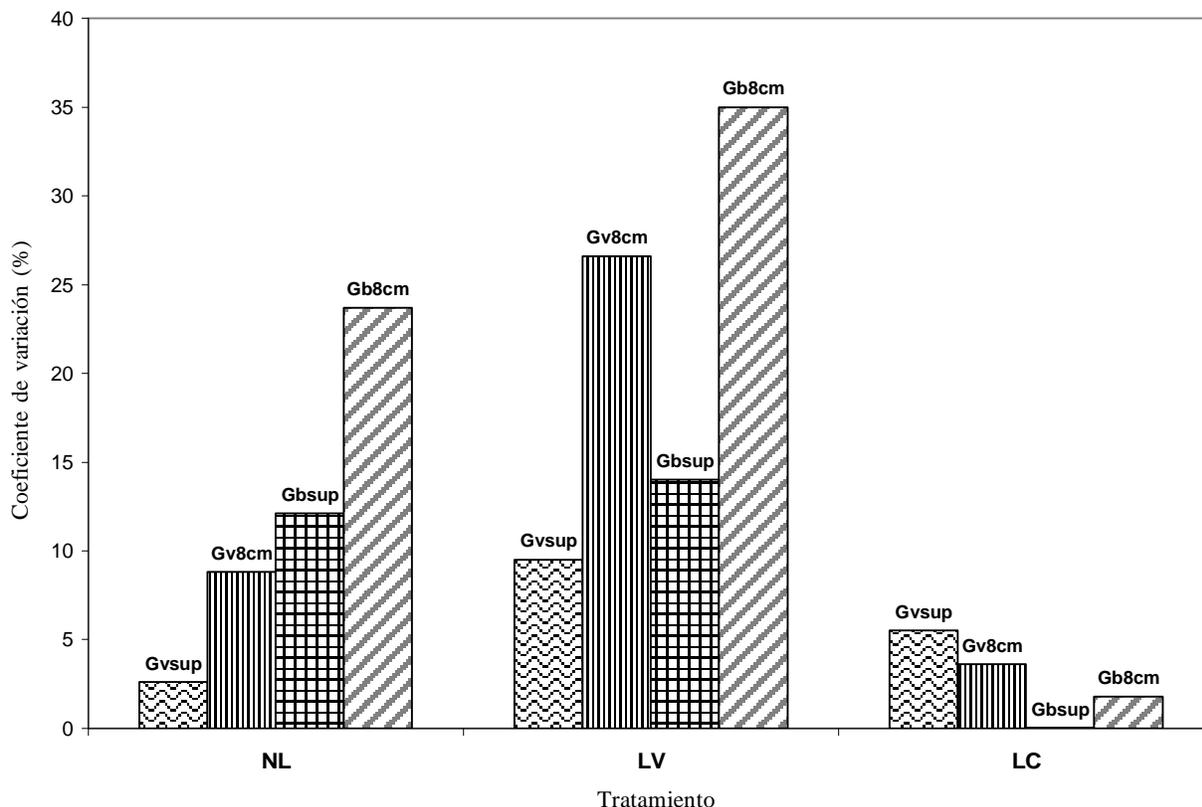


Figura 4. Comparación gráfica del coeficiente de variación asociado a suelo no disturbado (NL), labranza vertical (LV) y labranza convencional (LC) respecto al flujo de calor en suelo desnudo en la superficie (Gbsup), suelo desnudo a 8 cm de profundidad (Gb8cm), suelo protegido con vegetación en la superficie (Gvsup) y suelo protegido con vegetación a 8 cm de profundidad (Gv8cm).

LE y/o H, como quedó establecido inicialmente (Kizer y Elliott, 1991; Clark *et al.*, 2001; Massman y Lee, 2002; Ham y Heilman, 2003; Ochsner *et al.*, 2007).

En el Cuadro 1 se observa que, aunque para LV la magnitud de Rn es 19 kW m⁻², más grande que LC y más próxima a NL, sus índices son menores en ambos casos; además, el suelo en esa condición de manejo no es capaz de almacenar más de 37 kW m⁻², que trae como consecuencia una mayor disponibilidad de energía en la superficie.

Se ha comentado con anterioridad que las prácticas de labranza ejercen cambios importantes en el suelo, si bien algunos benéficos, otros podrían ser perjudiciales, pero de las propiedades del suelo que más son afectadas es la porosidad por efecto de los cambios en la densidad aparente que, en términos físicos, representa la forma en que las partículas de suelo son reempacadas en el mismo volumen de suelo (Moroizumi Y Horimo, 2002; Cadena-Zapata *et al.*, 2004; Udawatta *et al.*, 2008); de manera específica, la profundidad y el ancho de trabajo,

Cuadro 1. Índices Gx/Rn y magnitudes absolutas promedio diarias de los valores integrados de la energía en kW m² para Rn, DSx, y Rn-G.

Tratamiento	Rn	ΔSveg	Gveg/Rn	Rn-Gvsup	ΔSbar	Gbar/Rn	Rn-Gbsup
----- kW m ⁻² -----							
Suelo no disturbado	249	60	0.16	164	43	0.14	167
Labranza vertical	200	37	0.13	126	34	0.12	127
Labranza convencional	181	52	0.20	107	53	0.29	95

Gx/Rn = índice que relaciona el flujo energético en el suelo protegido con vegetación o suelo desnudo y la radiación neta; ΔSveg = energía almacenada en la capa de suelo protegido con vegetación; Gveg/Rn = índice que relaciona el flujo energético en el suelo protegido con vegetación y la radiación neta; ΔSbar = energía almacenada en la capa de suelo desnudo; Gbsup = flujo de energía en la superficie de suelo desnudo.

así como el modo de ataque de los implementos contribuyen en los cambios en distribución, forma y continuidad de poros, procesos que han sido discutidos en función de los diferentes sistemas de manejo del suelo (González-Cervantes *et al.*, 2004a;b).

Desde el punto de vista energético, lo anterior indica que LC es una práctica que contribuye en la retención y el almacenamiento de la energía en la capa del suelo estudiada, mientras que LV influye negativamente en este fenómeno. Se estima que su magnitud representa 15 y 25% para G_{vsup} y G_{bsup} , respectivamente. Esto significa que, en LV, la energía proveniente del sol como longitud de onda corta y longitud de onda larga tendrá menos atenuación en la superficie del suelo, lo cual contribuirá de acuerdo con la ley de la conservación de la energía, en el flujo de calor latente y flujo de calor sensible (Ochsner *et al.*, 2001; 2007; Deru, 2003; Prunty y Bell, 2005), que se expresan en mayores índices de aridez, reportado con anterioridad sobre todo para regiones del noreste de México, que corresponden justamente a la zona donde se realizó el presente estudio (UACH-CONAZA-SEDESOL-SAGARPA, 2004).

Análisis de Regresión

También es importante mencionar que en el análisis de regresión donde se definieron como variables dependientes a G_{vsup} y G_{bsup} y los valores positivos de R_n en el intervalo de 0.12 hasta 573 W m⁻², como variable independiente, pese a que se observaron tendencias lineales semejantes como se muestran en las Figuras 5a y b. Desde el punto de vista estadístico (Little y Hills, 1987), los variables obtenidos de este análisis confirman que el flujo de calor en el suelo desnudo es menos predecible que cuando se encuentra protegido con vegetación. Basta observar los valores de R^2 ($G_{vsup} = 0.644$ y $G_{bsup} = 0.494$), así como sus coeficientes de correlación que son + 0.8 y + 0.7, respectivamente. Esto, probablemente se debió a que el suelo desnudo se calentó y se enfrió mucho más rápido que el suelo protegido con vegetación. La alta sensibilidad del suelo desnudo, bajo el efecto de la radiación, teóricamente se debió a la pérdida acelerada de la humedad por la eliminación de la vegetación realizada por las operaciones de labranza, lo cual coincide con lo mencionado por Ham y Heilman (2003) y Ochsner *et al.* (2007).

CONCLUSIONES

- Al comparar los valores instantáneos a 8 cm de profundidad (G_{D8}) y los estimados para la superficie (G_{s_x}) para ambas condiciones de suelo (cubierto con vegetación y suelo desnudo), entre el suelo no disturbado (NL) y los dos tratamientos de labranza, labranza vertical (LV) y labranza convencional (LC), se distinguen modificaciones en las magnitudes y los tiempos de ocurrencia de G , donde se detectaron dos características fundamentales: i) entre NL y LC hay un comportamiento muy parecido, pero muy diferente con respecto a LV; y ii) la acción directa de los implementos de labranza sobre la cubierta vegetal modifica el comportamiento de flujo de calor disminuyendo o incrementando su sensibilidad al efecto de la radiación neta (R_n) sobre la superficie.
- La labranza produce modificaciones en las relaciones de flujo de calor en el suelo, lo cual, aunado a los efectos del cambio climático, en particular por el incremento de la temperatura en las regiones más secas de México, debe ser valorado debidamente, no sólo porque el flujo de calor en el suelo es uno de los componentes más importantes del balance de energía, sino porque se relaciona con procesos físicos, químicos y biológicos que se verifican en la capa del suelo.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido posible gracias al apoyo otorgado por la UAAAN y el CONACYT. Especialmente la División de Ingeniería por medio de los Departamentos de Ingeniería Mecánica Agrícola, Riego y Drenaje y Suelos. Se agradece también a los Ingenieros Teodoro Hernández Hernández e Ismael Vargas Martínez, con quienes se realizó buena parte de la investigación en esta etapa, así como a los responsables del rancho "Los Ángeles", por su notable participación y las facilidades otorgadas.

LITERATURA CITADA

- Cadena-Zapata, M., T. Gaytán-Muñoz y A. Zermeño-González. 2004. Desempeño de implementos en términos de consumo de energía y calidad de trabajo. *Revista Agraria-Nueva Época* 1(3): 12-17.
- Clark, D. A., S. Brown, D. W. Kicklighter, J. Q. Chambers, J. R. Thomlinson, and J. Ni. 2001. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. *Ecol. Applic.* 11: 356-370.

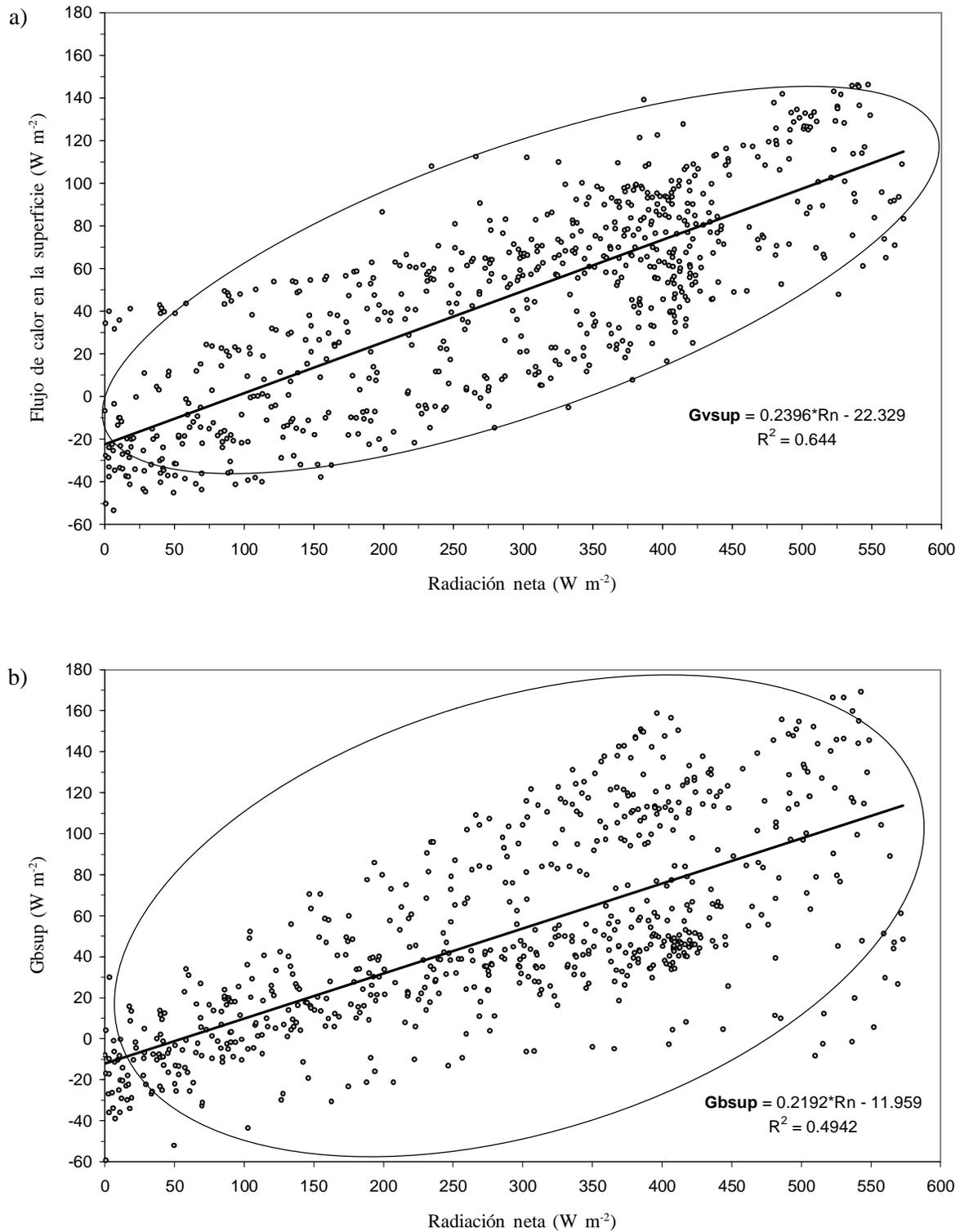


Figura 5. Modelos de regresión que relacionan el flujo energético en la superficie del suelo protegido con vegetación (a) y flujo de energético en la superficie del suelo desnudo (b).

- Deru, M. 2003. A model for ground-coupled heat and moisture transfer from buildings. Technical report. National Renewable Energy Laboratory. Golden Colorado, CO, USA.
- Drury, C. F., Ch. Sh. Tan, T. W. Welacky, T. O. Oloya, A. S. Hamill, and S. E. Weaver. 1999. Red clover and tillage influence on soil temperature, water content, and corn emergence. *Agron. J.* 91: 101-108.
- Elias, E. A., R. Cichota, H. H. Torriani, and Q. de Jong van Lier. 2004. Analytical soil-temperature model: correction for temporal variation of daily amplitude. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 784-788.
- FAO-ISRIC-ISSS-AISS-IBG. 1994. World reference base for soil resources. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.
- García, E. 1975. Climas Coahuila y Nuevo León, precipitación y probabilidad de lluvia en la República Mexicana y su evolución. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. México, D. F.
- González-Cervantes, G., I. Sánchez-Cohen y D. García-Arellano. 2004a. Relaciones entre el manejo del huerto de nogal y la porosidad del suelo. *Terra Latinoamericana* 22: 279-287.
- González-Cervantes, G., I. Sánchez-Cohen y J. P. Rossignol. 2004b. Morfología de poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante técnicas de análisis de imagen. Caso de una cuenca del norte de México. *Ingeniería Hidráulica en México* 19: 15-23.
- Ham, J. M. and J. L. Heilman. 2003. Experimental test of density and energy-balance corrections on carbon dioxide flux as measured using open-path eddy covariance. *Agron. J.* 95: 1393-1403.
- Hatfield, J. L., J. H. Prueger, and W. P. Kustas. 2007. Spatial and temporal variation of energy and carbon fluxes in Central Iowa. *Agron. J.* 99: 285-296.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1976. Cartografía de los temas: edafológica, geológica, topográfica y vegetación y uso del suelo. Cubrimiento: Agua Nueva (G14-C43) y Huachichil (G14-C44). Escala 1:50 000. Subdirección de Geografía/INEGI. México, D. F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2001. Base de datos geográficos, diccionario de datos edafológicos (alfanumérico). http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/normatividad/diccio/edaf_alf.pdf (Consulta: abril 24, 2007).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate change 2007: climate change impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. 4th Assessment report. Geneva, Switzerland.
- Kizer, M. A. and R. L. Elliott. 1991. Eddy correlation systems for measuring evapotranspiration. *Trans. ASAE* 34: 387-392.
- Lipiec, J., B. Usowicz, and A. Ferrero. 2006. Management effects of sloping vineyard on thermal properties of soil. International Soil Tillage Research Organization. 17th Triennial Conference. Kiel, Germany
- Little, T. M. and F. J. Hills. 1987. Statistical methods in agricultural research. Séptima reimpression en español. Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura. Trillas. Méxicio, D. F.
- Massman, W. J. and X. Lee. 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agric. For. Meteorol.* 113: 121-144.
- Moroizumi, T. and H. Horino. 2002. The effects of tillage on soil temperature and soil water. *Soil Sci.* 167: 548-559.
- Noborio, K., K. J. McInnes, and J. L. Heilman. 1996. Measurements of soil water content, heat capacity, and thermal conductivity with a single TDR probe 1. *Soil Sci.* 161: 22-28.
- Ochsner, T. E., R. Horton, and T. Ren. 2001. A new perspective on soil thermal properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1641-1647.
- Ochsner, T. E., T. J. Sauer, and R. Horton. 2006. Field test of the heat flux plate method and some alternatives. *Agron. J.* 98: 1005-1014.
- Ochsner, T. E., T. J. Sauer, and R. Horton. 2007. Soil heat storage measurements in energy balance studies. *Agron. J.* 99: 311-319.
- Prunty, L. and J. Bell. 2005. Soil temperature change over time during infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 766-775.
- Rebolledo-Robles, H. H. 2002. Manual SAS por computadora: análisis estadístico de datos experimentales. Trillas. México, D. F.
- SAS Institute. 2006. User's guide. Release 0.13. Statistics. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Sauer, T. J. and P. J. Pinter. 2007. Introduction to the symposium "Progress in radiation and energy balance measurement systems". *Agron. J.* 99: 238-239.
- UACH-CONAZA-SEDESOL-SAGARPA. 2004. Escenarios climatológicos de la República Mexicana ante el cambio climático. Universidad Autónoma Chapingo, CONAZA, Dirección de Vinculación y Transferencia de Tecnología, SEDESOL y SAGARPA. México, D. F.
- Udawatta, R. P., S. H. Anderson, C. J. Gantzer, and H. E. Garrett. 2008. Influence of prairie restoration on CT-measured soil pore characteristics. *J. Environ. Qual.* 37: 219-228.