

## INVESTIGACIÓN

### COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL SUELO BAJO CUBIERTAS PLÁSTICAS. III. SIMULACIÓN<sup>1</sup>

#### Soil thermal response under plastic covers. III. Simulation<sup>1</sup>

Enrique Misle A.<sup>2</sup> y Aldo Norero Sch.<sup>3</sup>

#### A B S T R A C T

A simplified simulation model was developed to predict soil temperature under plastic covers based on the numerical solution of the soil heat flow equation. This method requires the definition of the boundary conditions, which at the soil surface are solved through the radiation and energy balance. Also it considers the heat partitioning ratio and the albedo of the soil surface covered with plastic film. This parameter is variable according to the time of the day. Thus the soil surface temperature was estimated and treated as if it were identical to the temperature of the plastic. To start the simulation process and to determine the soil profile temperature, a periodic function combining the analytical solution and a Fourier analysis with four elements ( $k = 4$ ) was used. The temperature at 30 cm depth was considered constant for the model scale, which was experimentally confirmed. A computer program was elaborated that would operate at different time lapses and depth spacing according to soil thermal diffusivity. The assumption that plastic sheet was in direct contact with soil surface led to acceptable agreement between simulated and experimental results. However, it was also necessary to modify the values of surface emissivity and this remains a point needing further elucidation.

**Key words:** soil temperature, simulation model, plastic mulch, solarization.

#### R E S U M E N

Se desarrolló un modelo simple de simulación para predecir la temperatura del suelo bajo cubiertas plásticas sobre la base de la solución numérica de la ecuación de flujo de calor en el suelo. Ella requiere definir las condiciones de borde, que en la superficie son resueltas mediante el balance de radiación y energía. También considera un coeficiente de reparto de calor y el albedo de la superficie del suelo cubierto con plástico. Este parámetro es variable de acuerdo a la hora del día. Así se determinó la temperatura superficial del suelo, suponiendo que era la misma del plástico. Para iniciar el proceso de simulación y determinar la temperatura en el perfil del suelo se recurrió a una función periódica que combina la solución analítica y el análisis de Fourier con un número de elementos  $k = 4$ . La temperatura a 30 cm de profundidad se consideró invariable para la escala del modelo y estuvo corroborada experimentalmente. Se elaboró un programa computacional que pudiera operar a diferentes lapsos de tiempo y espaciamientos de profundidad, de acuerdo a la difusividad térmica del suelo. La hipótesis de que el plástico está en contacto directo con el suelo permitió que el modelo produjera resultados aceptables al contrastarlo con mediciones reales. Sin embargo, fue forzoso modificar el valor de la emisividad, por lo que se requiere mayor investigación para aclarar este punto.

**Palabras clave:** temperatura del suelo, modelo de simulación, acolchado plástico, solarización.

<sup>1</sup>Recepción de originales: 16 de enero de 2001.

<sup>2</sup>Universidad Católica del Maule, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Escuela de Agronomía, Casilla 278, Curicó, Chile. E-mail: emisle@hualo.ucm.cl

<sup>3</sup>Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Escuela de Agronomía, Casilla 306 - 22, Santiago, Chile.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la modificación en la rapidez del desarrollo de los cultivos puede resultar fundamental para el éxito del negocio productivo, en especial cuando se basa en diferenciar la oferta estacional de un producto. Dado que el crecimiento y desarrollo de los cultivos es afectado fuertemente por la temperatura, su magnitud determinará la rapidez con que se logre establecer un volumen de follaje fotosintético, afectando por lo tanto, el rendimiento, al modificar el período durante el cual un cultivo podrá captar la energía solar. Por lo general, interesa anticipar la fecha típica de inicio de cosechas, lo cual se consigue proporcionando condiciones térmicas más favorables. Es el caso conocido de los cultivos protegidos, donde los invernaderos representan la mayor expresión de esta condición. Tanto éstos, como los túneles bajos son medios efectivos para incrementar la temperatura ambiental en la que se desarrollan las plantas.

No obstante, se sabe que con las técnicas mencionadas también se modifica la temperatura del suelo, observándose efectos aún más positivos al aplicar medidas que directamente la incrementan para producción anticipada. Entre los medios más utilizados se encuentran las cubiertas plásticas de diverso tipo (mulch), principalmente a base de polietileno (PE). En esta materia se han ensayado diversos tipos de materiales, desde cubiertas orgánicas, incluyendo el papel, hasta recubrimientos asfálticos y aluminizados (FAO, 1990). Hoy, el PE es la opción más frecuentemente utilizada por su bajo costo, fácil aplicación y remoción, aunque se discute su impacto ambiental, debido a su lenta degradación. Actualmente, se investiga en alternativas de cubiertas plásticas estructuralmente más complejas que las hacen bio y fotodegradables, incluso que cambian de color en el campo (Hatt-Graham *et al.*, 1995). Una práctica cada vez más difundida es la solarización, es decir, la utilización de láminas de alta transparencia para permitir una mayor penetración de la radiación solar, llevando al extremo el incremento térmico y obteniendo una de-

sinfección de organismos patógenos, muerte de insectos y de malezas en la capa superficial del suelo (Gutkowski y Terranova, 1991). Esta práctica representa una de las alternativas más inocuas al uso del bromuro de metilo para los mismos fines, producto que será próximamente retirado del mercado por su alta toxicidad y reactividad con el ozono.

Las cualidades propias del tipo de material que se utilice como mulch determinan en forma importante el resultado esperado con esta práctica (Gutkowski y Terranova, 1991). En un artículo anterior se trató el tema en detalle y se mostraron las diferencias entre cuatro tipos de láminas plásticas comunes que se encuentran en el mercado nacional (Misle y Norero, 2001). El efecto de una cubierta sobre el suelo se transmite al interior del mismo de acuerdo a la ecuación general de flujo de calor en el suelo. Anteriormente, se describió el modo en que una cubierta plástica modifica la temperatura del suelo a diferentes profundidades (Misle y Norero, 2002).

La consideración del efecto de la humedad del suelo reviste mayor dificultad cuando se trata del estudio de mulches o acolchados porosos, donde las características del material y el espesor de la capa deben ser cuantificadas (Bussiére y Cellier, 1994; Gupta *et al.*, 1984). Por lo tanto, los estudios en estos casos son algo diferentes a aquéllos en cubiertas no porosas (films) (Wu *et al.*, 1996). Dado que en la práctica la cobertura del suelo se hace en franjas o hileras, algunos autores han considerado esta situación, definiendo la unidad de análisis entre el centro de la franja sin mulch y el centro del mulch (Chung y Horton, 1987; Sui *et al.*, 1992).

Algunos autores han elaborado modelos que incorporan la presencia de una lámina plástica en el balance de radiación y resuelven la temperatura del suelo en el tiempo y en profundidad, pero al tener en cuenta la cubierta plástica hacen complejo el algoritmo de cálculo (Mahrer, 1980; Ham y Kluitenberg, 1994; Wu *et al.*, 1996). Así también, la consideración de resistencias especí-

ficas ha permitido simular la temperatura del suelo en presencia de cultivos sobre él (Luo *et al.*, 1992).

La utilización de plásticos en agricultura con fines de aplicación al suelo como mulch o para solarizar, se hace cada día una práctica más común, sin que exista un medio cuantitativo aceptable para categorizar la variedad de la oferta de materiales en el mercado que oriente al agricultor. El objetivo de esta publicación, es presentar el desarrollo de un modelo predictivo para pronosticar, evaluar y comparar la eficacia de cubiertas plásticas, por vía de la simulación de la temperatura del suelo modificada por ellas. El planteamiento experimental ha sido presentado en artículos anteriores y sus resultados han servido para la verificación del modelo propuesto (Misle y Norero, 2001; 2002).

## TEORÍA

### Temperatura en la superficie de un suelo cubierto con una lámina plástica

Los intercambios radiativos y los flujos convectivos propios de un balance de energía permiten establecer una ecuación para determinar la temperatura superficial del suelo. El diagrama de la Figura 1 representa la situación analizada.

El movimiento de calor,  $G$ , fue expresado como resultado de un gradiente térmico entre dos puntos ( $\partial T/\partial z$ ) y afectado por una resistencia al flujo. El recíproco de esta resistencia es la conductividad térmica,  $\eta$  (Campbell, 1985; Auvermann *et al.*, 1992; Misle y Norero, 2002):

$$G = \eta (\partial T / \partial z) \quad [1]$$

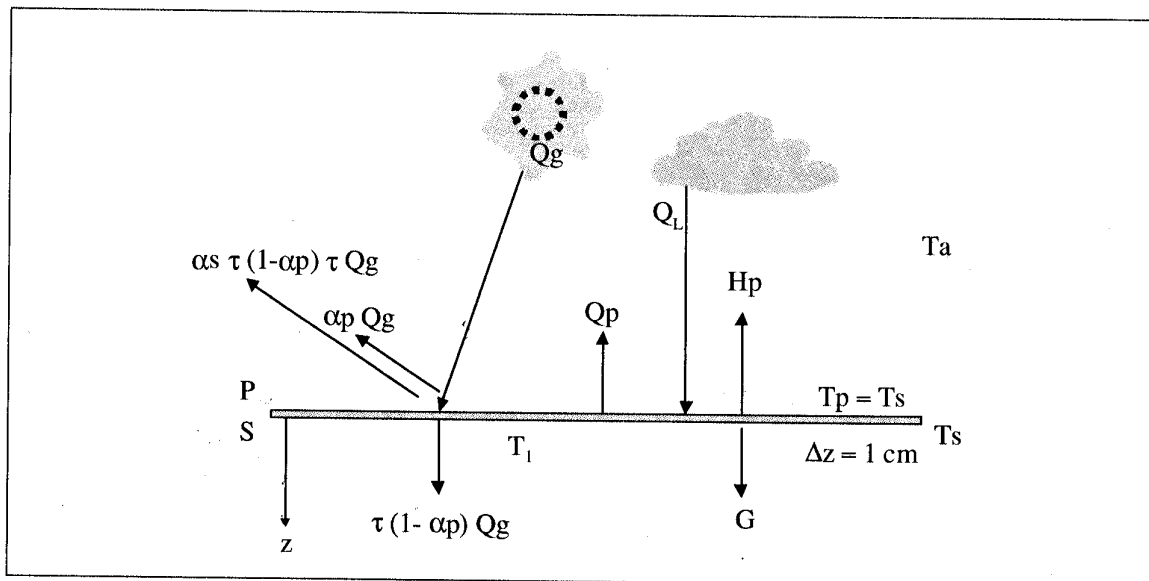


Figura 1. Diagrama del balance de radiación bajo el supuesto que la temperatura del plástico ( $T_p$ ) es igual a la de la superficie del suelo ( $T_s$ ). Símbolos explicados en el texto.

Figure 1. Radiation balance diagram under the assumption that the plastic temperature ( $T_p$ ) is equal to soil surface temperature ( $T_s$ ). Symbols explained in text.

Este flujo ingresa o egresa del suelo. Cada suelo posee habilidad diferente para retener calor; dicha propiedad es la capacidad calórica,  $\zeta$  y está dada por:

$$\zeta = (0,46) m + (0,6) o + w \quad [2]$$

donde: m, es la fracción volumétrica mineral del suelo, o, es la fracción volumétrica orgánica del suelo y w, la fracción volumétrica del agua en el suelo (Sellers, 1965).

La conductividad térmica varía de acuerdo con la densidad aparente del suelo, contenido mineral, materia orgánica y contenido de agua. Algunos investigadores definen una función empírica no lineal que da cuenta en un modo más aproximado de la relación (Campbell, 1985; Chung y Horton, 1987). No obstante, para los rangos normales de humedad del suelo en que se satisfacen los requerimientos vegetales, otros asumen una función lineal (Bussière y Cellier, 1994). En estas condiciones, son mucho más fuertes los cambios debidos a la textura que al contenido de humedad (Sellers, 1965).

Estas relaciones son básicas en el estudio del flujo de calor en el suelo. Si se supone que éste ocurre sólo en dirección vertical, z, a partir de [1] puede formularse la ecuación diferencial dependiente del tiempo, t (Sellers, 1965; Campbell, 1985):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\eta \partial^2 T}{\zeta \partial z^2} \quad [3]$$

en donde  $\zeta$  es la capacidad calórica y  $\eta$  es la conductividad térmica. Ambos pueden ser sustituidos por  $\kappa$ , la difusividad térmica, definida como (Sellers, 1965; Campbell, 1985):

$$\kappa = \eta / \zeta \quad [4]$$

En un suelo cubierto con algún tipo de acolchado, se deben incorporar las propiedades radiantes del material, ya sea directa o indirectamente.

En un primer análisis se resolvió la temperatura superficial tomando en consideración el albedo del plástico, su emisividad y su transmisividad, considerando la existencia de un pequeño espacio entre la lámina y la superficie del suelo. Esta solución, sin embargo, planteó un nivel de complejidad innecesario para el objetivo requerido. Ella exigió también conocer la temperatura a una profundidad de referencia que si bien es experimentalmente obtenible haría poco práctico el modelo predictivo. Por tal razón, se optó por admitir el supuesto que la lámina de plástico estaba en contacto íntimo con el suelo de modo de equiparar instantáneamente sus temperaturas. Las características radiantes de la superficie del suelo fueron así virtualmente reemplazadas por las de la lámina plástica.

Los flujos de calor sensible y la emisión radiante quedaron expresados del siguiente modo:

- a. La emisión de onda larga de la superficie del plástico,  $Q_p$  [ $\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ ], por una aproximación lineal de la Ley de Stefan-Boltzmann en función de su emisividad,  $\epsilon_p$ , y temperatura del plástico,  $T_p$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] (Norero, 1976):

$$Q_p = \epsilon_p (0,43 + 0,0088 T_p) \quad [5]$$

- b. El flujo de calor sensible desde el plástico,  $H_p$  [ $\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ ], es dependiente de la densidad del aire,  $\rho$ , de su calor específico,  $c$ , su coeficiente de transferencia de calor,  $D$  y de la diferencia de temperatura entre el plástico y el aire,  $T_p - T_a$ :

$$H_p = \rho c D (T_p - T_a) \quad [6]$$

Los términos constantes pueden fundirse en  $K = \rho c D$ , en que  $K$  es el coeficiente de difusión de calor o difusividad [ $\text{cal cm}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{min}^{-1}$ ] y es físicamente determinado por la resistencia en la capa límite y la resistencia aerodinámica sobre ella.

- c. El flujo de calor al interior del suelo,  $G$  [ $\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ ], según la expresión [1], a través

del primer centímetro de espesor, cuya temperatura es  $T_1$  [°C], siendo  $T_s$  la de la superficie ( $T_s = T_p$ ):

$$G = \eta (T_s - T_1) \quad [7]$$

La radiación neta superficial,  $Q_n$ , fue expresada así:

$$Q_n = Q_g + Q_L - Q_p - \alpha_p Q_g \quad [8]$$

donde:  $Q_g$  es la radiación solar global incidente,  $Q_L$  radiación atmosférica recibida por la superficie,  $Q_p$  la radiación de onda larga emitida por el plástico y  $\alpha_p Q_g$  la fracción reflejada por la superficie con  $\alpha_p$  como albedo del plástico.

El balance de energía que iguala a la radiación neta fue descrita por:

$$Q_n = H_p + G \quad [9]$$

lo cual supone que no hubo pérdidas por calor latente de vaporización del agua del suelo.

Al combinar las ecuaciones [5], [6], [7], [8], y [9] y separando algebraicamente la incógnita, se obtuvo una expresión para estimar la temperatura de la lámina plástica:

$$Q_n = (1 - \alpha_p) Q_g + Q_L - \epsilon_p (0,43 + 0,0088 T_p) = K (T_p - T_a) + \eta (T_p - T_1) (1 - \alpha_p) Q_g + Q_L - \epsilon_p 0,43 + K T_a + \eta T_1 = \epsilon_p 0,0088 T_p + K T_p + \eta T_p = (0,0088 \epsilon_p + K + \eta) T_p$$

de donde resulta:

$$T_p = ((1 - \alpha_p(h)) Q_g + Q_L + K T_a + \eta T_1 - 0,43 \epsilon_p) / (0,0088 \epsilon_p + K + \eta) \quad [10]$$

donde  $\alpha_p(h)$  es el albedo de la superficie con plástico. Dado que existe una marcada variación diurna del albedo por la variación en la incidencia solar, fue necesario expresar empíricamente su dependencia por la función cíclica siguiente, donde  $h$  es la hora del día. Esta función estuvo

sugerida por datos de Monteith y Szeicz, citados por Chang (1968):

$$\alpha_p(h) = 1 - 0,94 \text{ sen}^2 (5,23 - 0,26 h) \quad [11]$$

El uso de [10] para estimar la temperatura superficial del suelo requiere la medición a 1 cm de profundidad ( $T_1$ ) y conocer la conductividad térmica ( $\eta$ ). En términos prácticos esto conduce a la necesidad de monitorear la temperatura a esa profundidad, estableciendo una fuerte limitación al poder predictivo de esta fórmula. Aún así, ello no representaría gran dificultad puesto que podría utilizarse un captador para obtener un registro; así se calcularía con bastante fidelidad la temperatura superficial, que ofrece gran limitación instrumental para ser medida.

Como el propósito es contar con una herramienta predictiva, se buscó una expresión que sustituyera el dato de  $T_1$ . A tal fin se recurrió al concepto de coeficiente de reparto,  $Y$ , o sea la relación entre flujo difusivo hacia el interior del suelo y el flujo convectivo hacia la atmósfera:

$$Y = G / H_p$$

Este parámetro depende de la velocidad del viento,  $U$  [ $\text{m s}^{-1}$ ] y de las características aerodinámicas de la superficie, la que, tratándose de una superficie muy lisa fue estimada en 8,3:  $Y = 8,3 / U^{0,8}$ . Esta fórmula es una simplificación del tratamiento explicado por Sellers (1965).

Luego, el balance de energía es:

$$(1 - \alpha_p(h)) Q_g + Q_L - Q_p = (1 + Y) H_p$$

Por lo cual, finalmente se tiene que:

$$T_p = ((1 - \alpha_p(h)) Q_g + Q_L + (1 + Y) K T_a - 0,43 \epsilon_p) / ((1 + Y) K + 0,0088 \epsilon_p) \quad [12]$$

Expresión que resuelve  $T_s$ , donde:

$$1 + Y = 1 + (8,3 / U^{0,9})$$

Los factores variables de [12] ( $\alpha_p$ ,  $Q_g$ ,  $Q_L$ ,  $U$ ,  $T_a$ ) deben entenderse como valores promedio horarios, así como su resultado,  $T_p$ .

### Temperatura en el interior del suelo

Para calcular la variación de temperatura al interior del suelo se empleó la solución numérica de la ecuación de flujo calórico [3] propuesta por Hanks *et al.* (1971) que puede muy convenientemente plantearse así:

$$0,5 = \kappa \Delta t / \Delta z^2 \quad [13]$$

$\Delta t$  son lapsos de tiempo y  $\Delta z$  intervalos de profundidad y  $\kappa$  la difusividad calórica ([4]). El valor de esta última se obtuvo experimentalmente.

La utilización de [13] supone conocer las condiciones de borde. Además, para comenzar los cálculos fue necesario especificar las condiciones iniciales. A tal fin debió calcularse la temperatura en la superficie del suelo,  $T_p$  y fijar valores de temperatura en  $\Delta z$  para algún  $\Delta t$  dado. La temperatura superficial del suelo se obtuvo de [12] más su evolución diaria a través de la serie de Fourier. La temperatura inicial en  $\Delta z$  en tiempo  $\Delta t$ , se calculó por la función periódica propuesta por Van Wijk (1966):

$$T(z, t) = \sum_{k=1}^4 T_d + \sum A_k \exp(-z/z_D k^{1/2}) \sin(k\omega t + B_k - z/z_D k^{1/2}) \quad [14]$$

donde  $T_d$  es la temperatura media diaria de la superficie ( $(T_{px} + T_{pi})/2$ ). La temperatura máxima diaria del mulch plástico,  $T_{px}$ , se calculó en el zenit solar, es decir, al ocurrir la máxima insolación y la temperatura mínima,  $T_{pi}$ , al despuntar el sol, cuando el enfriamiento superficial nocturno llegaba a su mayor valor.  $A_k$  y  $B_k$  son coeficientes de ajuste de la serie de Fourier;  $\omega$  es la frecuencia radial y su valor está dado por  $2\pi/P$ , donde  $P$  es el período de oscilación del ciclo térmico. En escala de horas  $\omega = 0,2618$ . Fue suficiente fijar el número de elementos de la serie en  $k = 4$ . El valor de la profundidad de amortiguación

(damping depth) de la onda de calor según esta función es  $z_D = (2\kappa/\omega)^{1/2}$ , en la cual la amplitud del ciclo térmico se ha reducido a la tercera parte, mientras que a  $z = 4,61 z_D$ , su valor es 1% del correspondiente en superficie (Sellers, 1965; Campbell, 1985). La temperatura a una profundidad final de cálculo, se definió tomando en cuenta la oscilación o amplitud de la onda térmica. Una profundidad especificada puede considerarse invariable o bien responder a una oscilación periódica anual, a escala diaria. La profundidad a la cual cesaba prácticamente la oscilación térmica diaria fue 30 cm.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Registro y análisis de datos

Los pormenores del ensayo experimental han sido informados en dos artículos anteriores (Misle y Norero, 2001; 2002). Específicamente, para la comprobación del modelo se utilizaron datos obtenidos de la siguiente manera: lugar, Campus San Miguel de la Universidad Católica del Maule en la ciudad de Talca (35° 26' lat. Sur, 71° 26' long. Oeste, alt. 110 m.s.n.m), ensayo de campo realizado durante noviembre de 1996; suelo, Haplanthrepts con denominación local variación de la serie Mariposa; tratamiento: temperatura a cuatro profundidades; diseño: bloques completos al azar con cuatro repeticiones; tamaño de parcela, 0,8 m por 1,25 m; registro de temperatura, a profundidades de 1, 3, 7 y 15 cm, usando termistores con memoria de máxima y mínima diarias; duración, 14 días. En el último día de esta fase experimental se registró el ciclo horario completo. Este mismo planteamiento se aplicó tanto al suelo descubierto como al suelo cubierto con polietileno transparente.

Los datos necesarios para realizar el balance de energía y resolver las fórmulas [10] y [12] fueron obtenidos instrumentalmente en el caso de radiación solar ( $Q_g$ ) y del viento ( $U$ ), en la estación meteorológica adyacente a las parcelas experimentales. Además, los registros obtenidos allí, de temperatura del aire, humedad relativa y

condiciones de nubosidad se emplearon para deducir el valor de la radiación atmosférica ( $Q_L$ ) (Norero, 1976). Se midió la humedad del suelo mediante tensiómetros y bloques de yeso, lo que permitió constatar muy poca variación. Por tal motivo, los valores calculados de capacidad calórica se consideraron constantes. Además, por la relación [13] se derivó experimentalmente la difusividad térmica ( $\kappa$ ), la cual, por igual motivo se consideró constante. De la relación [4] se obtuvo la conductividad térmica. Ésta se empleó para calcular la temperatura superficial mediante la fórmula [10].

Se elaboró un programa en planilla electrónica Quattro-Pro para Windows, que permitió estimar la temperatura superficial del suelo, resolviendo las ecuaciones [12] y [14] a partir de la información meteorológica y de la temperatura medida a 1 cm de profundidad [10]. (Programa PLASTER disponible en formato wb1: emisle@hualo.ucm.cl)

#### Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico del ajuste del modelo, calculando el error de cuadrados medios residuales (ECMR) de la comparación entre las predicciones del modelo y los valores observados de temperatura a diferentes profundidades bajo cubierta plástica con la ayuda de un programa en planilla electrónica, utilizando la siguiente expresión:

$$ECMR = \sqrt{\frac{\sum (\text{observado} - \text{simulado})^2}{n}}$$

La bondad de ajuste se evaluó además mediante el coeficiente de correlación.

### RESULTADOS

El valor de la difusividad térmica fue  $17,8 \text{ cm}^2 \text{ h}^{-1}$  y la capacidad calórica  $0,39 \text{ cal cm}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . De estos valores se dedujo que la conductividad térmica fue  $0,1157 \text{ cal cm}^{-1} \text{ min}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Los valores simulados fueron comparados con los valores reales más cercanos (Cuadro 1). Debido a que los intervalos  $\Delta t$  y  $\Delta z$  (ecuación 14) necesarios para satisfacer la solución numérica de la ecuación de flujo de calor imponen una tabulación fija, las comparaciones sólo pueden hacerse con la profundidad más cercana al dato experimental.

La Figura 2 compara gráficamente los valores reales en la superficie del suelo en cuanto fueron derivados de mediciones, con el resultado de la simulación, empleando las fórmulas [10] y [12].

La condición inicial del programa de cálculo es la hora en que la temperatura es similar a diferentes profundidades. Se observó que esto ocurría a las 20:00 hora solar, aproximadamente 21:00, hora local (Misle y Norero, 2002).

**Cuadro 1. Comparación entre valores observados (real) y simulados (sim) (Ecuación 12) de temperatura de suelo bajo polietileno transparente utilizando el error de cuadrados medios residuales (ECMR) y el coeficiente de correlación (CC)**

**Table 1. Comparison of observed (real) and simulated (sim) values (Equation 12) of soil temperature under transparent polyethylene using residual mean square error (ECMR) and correlation coefficient (CC)**

	1 cm real/0 cm sim	3 cm real/3,5 cm sim	7 cm real/7 cm sim	15 cm real/14 cm sim
ECMR, $^\circ\text{C}$	3,7529	1,7965	1,2600	2,7627
CC	0,9921	0,9863	0,9906	0,6724

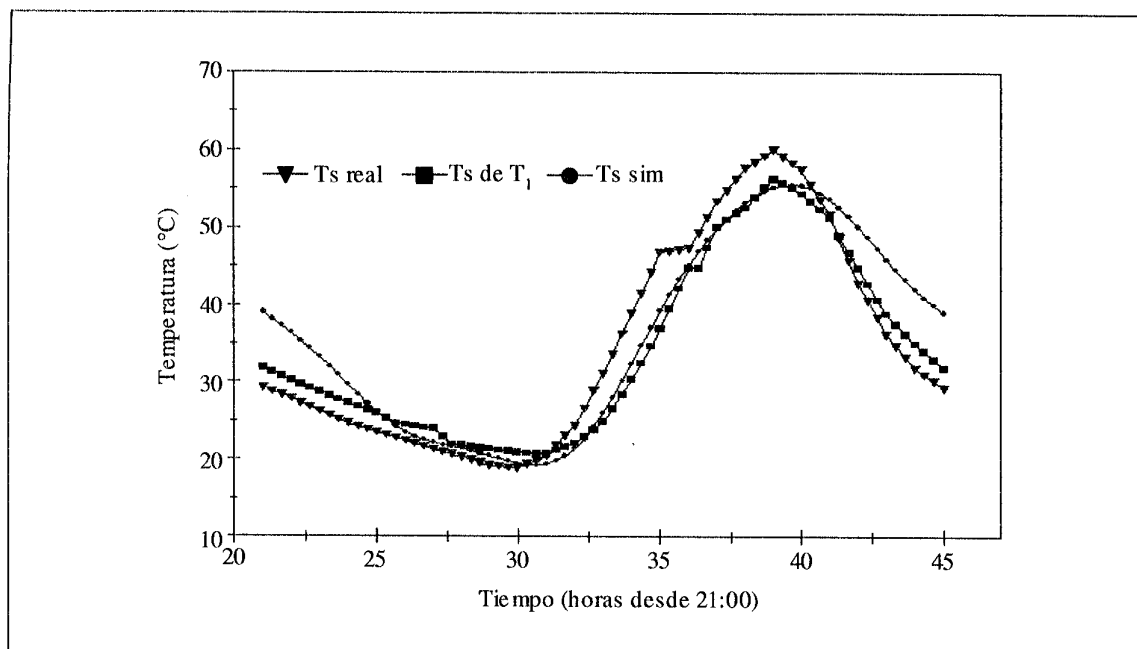


Figura 2. Comparación entre valores de temperatura bajo polietileno transparente, reales ( $T_s$  real) en superficie (derivados de mediciones) y valores calculados por las soluciones propuestas:  $T_s$  de  $T_1$ , es la temperatura superficial simulada conociendo la temperatura a 1 cm de profundidad (Ecuación 10) y  $T_s$  sim, es la temperatura simulada sin este dato (Ecuación 12).

Figure 2. Comparison between temperature values under transparent polyethylene, real ( $T_s$  real) at surface (derived from measurements) and calculated by proposed solutions:  $T_s$  of  $T_1$ , is surface temperature simulated knowing temperature at 1 cm depth (Equation 10) and  $T_s$  sim, is temperature simulated without this data (Equation 12).

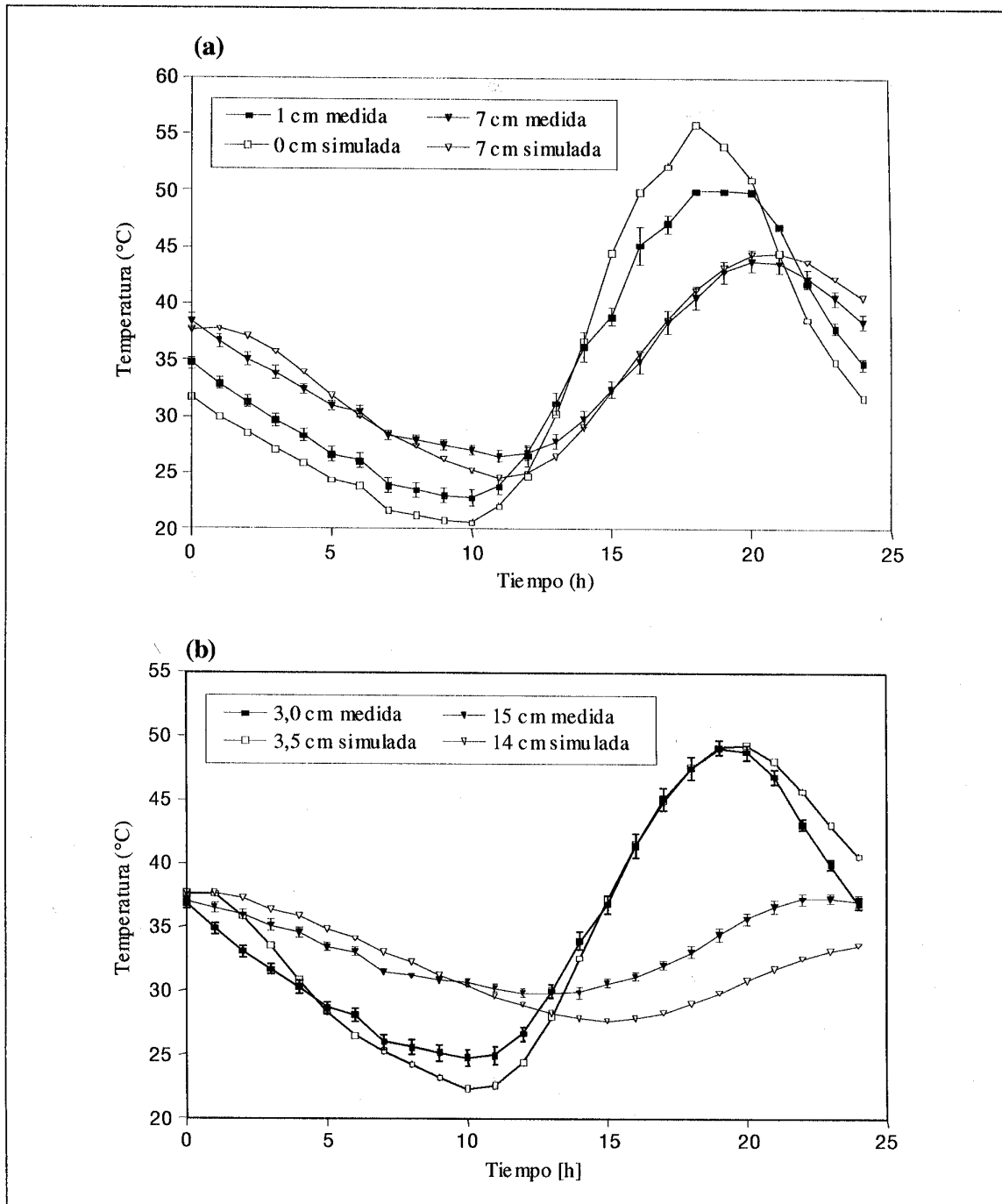
Además, como condición de borde inferior se fijó la temperatura a la profundidad de 30 cm. Esto obligó a extender los cálculos hasta esta profundidad, pero presenta la ventaja de apoyarse en observación; su desventaja es que introduce una ligera distorsión en los cálculos que se determinan en profundidad. Según la teoría del flujo calórico (Van Wijk, 1966) a 30 cm de profundidad la amplitud térmica es sólo un 7,5% del valor observado en superficie ( $e^{-z/z_D} = e^{-30/11,6}$ ,  $z_D = 11,6$  cm) por lo cual se consideró aceptable como invariable para cálculos a escala diaria y horaria. De hecho, en todo el período de 32 días la variación de temperatura a esta profundidad no superó cuatro grados. Concretamente, durante la fase experimental que se comenta, la oscilación diaria a esta profundidad no excedió un grado.

La Figura 3 muestra la evolución de la temperatura en un ciclo diario bajo polietileno transparente, comparando los valores reales con los simulados.

## DISCUSIÓN

El modelo presentado se simplificó al extremo de suponer que el mulch está en contacto directo con el suelo, sin que exista una capa de aire entre ambos. Así,  $T_p = T_s$ . Se omitió el dato de la transmisividad del plástico y su emisividad está alterada, puesto que se debe reducir su valor a la tercera parte, lo que indica que las consecuencias de la simplificación se han transmitido a este componente que debe involucrar un efecto de aislación, el que se produce con el espacio de aire realmente existente. Además, el cambio en el comportamiento de la cubierta es diferente entre el día y la noche, puesto que para láminas





**Figura 3. Temperatura del suelo bajo polietileno transparente. Comparación entre datos experimentales y simulados. (a) 1 cm medida con 0 cm simulada y 7 cm de profundidad. (b) 3 cm medida con 3,5 cm simulada y 15 cm medida con 14 cm simulada. Las barras verticales representan el error estándar; tiempo desde 21:00.**

**Figure 3. Soil temperature under transparent polyethylene. Comparison between experimental and simulated data. (a) 1 cm measured vs. 0 cm simulated and 7 cm depth. (b) 3 cm measured vs. 3.5 cm simulated and 15 cm measured vs. 14 cm simulated. Vertical bars are standard error; time from 21:00.**

transparentes se acentúa la influencia de la condensación de agua bajo el plástico (Ham y Kluitenberg, 1994). El valor que toma  $\epsilon_p$  es 0,3 y constituye un valor de ajuste del modelo, mientras que su valor empírico es 0,85 (fórmula 12). Con este factor modificado, se logró la simulación satisfactoria que muestra el Cuadro 1 y las Figuras 2, 3 y 4.

La mayor oscilación en los centímetros superficiales indica que a estas profundidades reviste mayor importancia la fidelidad de los valores calculados con respecto a la situación real, puesto que es el sitio donde ocurren los principales procesos de interés agronómico como la germinación de semillas, mineralización de residuos y otros. En la Figura 3 puede observarse esta situación a 1 y a 3 cm. Asimismo, debe desprejiciarse la discrepancia observada en las temperaturas superficiales más altas a 1 cm de profundidad

del suelo cubierto con plástico comparado con las simuladas en superficie (Figura 3a) dado que los datos reales están truncados sobre 50 °C por saturación de los termómetros, situación que se tuvo presente (Misle y Norero, 2002).

Por otra parte, la ecuación [12], operando en conjunto con [11], ha mostrado ser aplicable a la situación de suelo descubierto, lo que es una muestra que el programa es útil en diferentes tipos de cubiertas y que puede representar para efectos prácticos el comportamiento térmico del suelo (Figura 4). Puesto que el trabajo experimental mostró las diferencias cuantitativas en el comportamiento de diferentes cubiertas plásticas, bastaría tomar en consideración los ajustes proporcionales para aplicar el programa a la resolución de cálculos en esas condiciones (Misle y Norero, 2001).

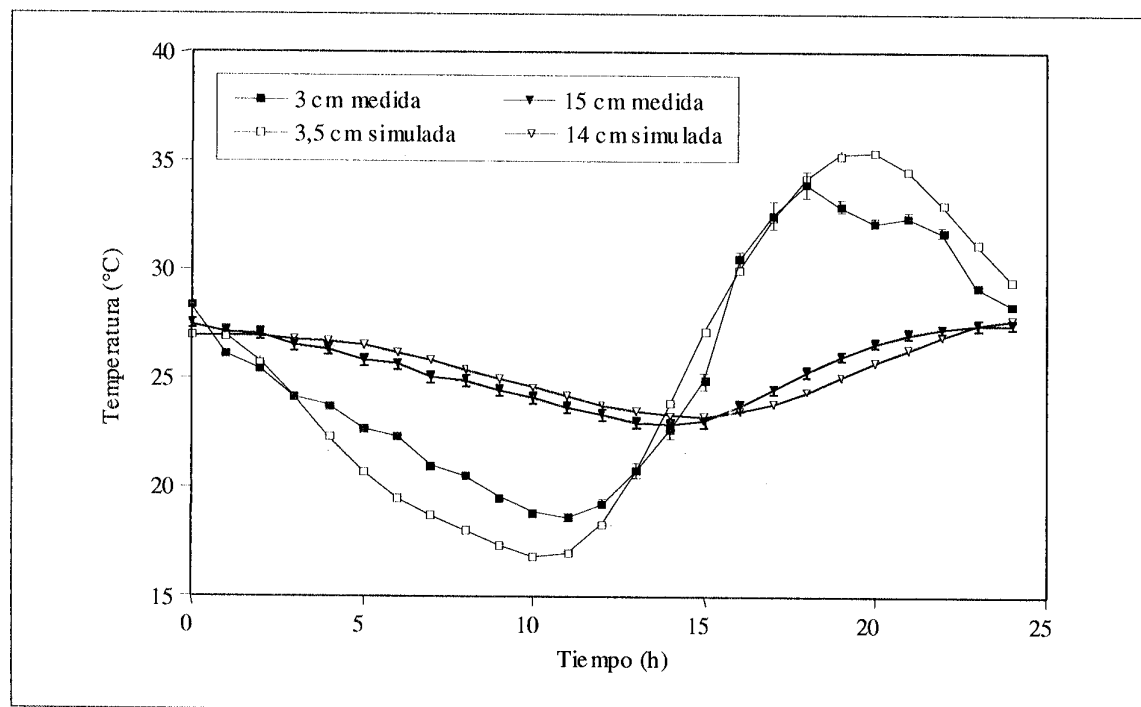


Figura 4. Comparación de cálculos de simulación con datos experimentales en suelo descubierto a dos profundidades. Las barras verticales representan el error estándar; tiempo desde 21:00.

Figure 4. Comparison of simulated calculations with experimental data in bared soil at two depths. Vertical bars are standard error; time from 21:00.

## CONCLUSIONES

La suposición de que el plástico está en contacto directo con el suelo, permitió obtener del modelo una simulación aceptable del régimen térmico del suelo bajo plástico transparente, pero fue necesario modificar el valor de la emisividad de la superficie. Esto requiere mayor investigación para aportar en la aclaración de estas diferencias, en particular para incorporar el efecto de la condensación de agua bajo la superficie plástica.

El modelo simuló satisfactoriamente también la variación de temperatura del perfil del suelo descubierto.

Parece por tanto posible evaluar diferentes cubiertas plásticas, modificando las condiciones iniciales en virtud de sus diferencias con el polietileno transparente.

Si bien el experimento se realizó a humedad constante, por lo cual la difusividad térmica no varió, el modelo y su solución poseen la flexibilidad necesaria para admitir los cambios producto de variación en la humedad del suelo.

## LITERATURA CITADA

- Auvermann, B., M. McFarland, and D. Hill. 1992. *In situ* determination of soil thermal characteristics. Trans. ASAE 35:833-839.
- Bussièrè, F., and P. Cellier. 1994. Modification of the soil temperature and water content regimes by a crop residue mulch: experiment and modeling. Agric. For. Meteorol. 68:1-28.
- Campbell, G. 1985. Soil physics with BASIC. Transport models for soil-plant systems. 150 p. Elsevier, The Netherlands.
- Chang, J-H. 1968. Climate and Agriculture: an ecological survey. 304 p. Aldine Pub. Co., Chicago, Illinois, USA.
- Chung, S., and R. Horton. 1987. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. Water Resour. Res. 23:2175-2186.
- FAO. 1990. Protected cultivation in the mediterranean climate. 313 p. Plant Production and Protection Paper 90. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
- Gupta, S., W. Larson, and R. Allmaras. 1984. Predicting soil temperature and soil heat flux under different tillage-surface residue conditions. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:223-232.
- Gutkowski, D., and S. Terranova. 1991. Physical aspects of soil solarization. p. 48-68. Plant Production and Protection Paper 109. In Proceedings of the First International Conference on Soil Solarization, Amman, Jordan. 19-25 February, 1990. FAO, Rome, Italy.
- Ham, J., and G. Kluitenberg. 1994. Modeling the effect of mulch optical properties and mulch-soil contact resistance on soil heating under plastic mulch culture. Agric. For. Meteorol. 71:403-424.
- Hanks, R.J., D.D. Austin, and W.T. Ondrechen. 1971. Soil temperature estimation by a numerical method. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 35:665-677.
- Hatt-Graham, H., D. Decoteau, D. Linvill, and H. Graham. 1995. Development of a polyethylene mulch system that changes color in the field. HortScience 30:265-269.
- Luo, Y., R. Loomis, and T. Hsiao. 1992. Simulation of soil temperature in crops. Agric. For. Meteorol. 61:23-38; 1 appendix.
- Mahrer, Y. 1980. A numerical model for calculating the soil temperature regime under transparent polyethylene mulches. Agric. Meteorol. 22:227-234.

- Misle, E., y A. Norero. 2001. Comportamiento térmico del suelo bajo cubiertas plásticas. I. Efecto de diferentes tipos de láminas. *Agricultura Técnica (Chile)* 61:488-499.
- Misle, E., y A. Norero. 2002. Comportamiento térmico del suelo bajo cubiertas plásticas. II. Efecto del polietileno transparente a diferentes profundidades. *Agricultura Técnica (Chile)* 62:133-142.
- Norero, A. 1976. La evapotranspiración de los cultivos. Aspectos agrofísicos. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (C.I.D.I.A.T), Mérida, Venezuela.
- Sellers, W. 1965. *Physical Climatology*. 272 p. The University of Chicago Press, Chicago, USA.
- Sui, H., D. Zeng, and F. Chen. 1992. A numerical model for simulating the temperature and moisture regimes of soil under various mulches. *Agric. For. Meteorol.* 61:281-299.
- Van Wijk, W. 1966. *Physics of Plant Environment*. 382 p. 2nd ed. North Holland Pub. Co., Amsterdam, The Netherlands.
- Wu, Y., K. Perry, and J. Ristaino. 1996. Estimating temperature of mulched and bare soil from meteorological data. *Agric. For. Meteorol.* 8:299-323.