

Modelo y simulación de la transferencia de calor bajo el suelo con acolchado plástico

Modeling and simulation of heat transfer under soil with plastic mulch

Carlos Armando De Castro y Orlando Porras Rey

*Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes
Cra. 1 Este # 19A – 40, Bogotá, Colombia*

RESUMEN

En el presente trabajo se modela la transferencia de calor en el suelo cubierto con acolchados plásticos de acuerdo a las condiciones meteorológicas imperantes. La ecuación del calor se resuelve para el perfil de temperaturas por medio de un método de diferencias finitas implícito y el uso del método de Newton-Raphson multidimensional para resolver el sistema de ecuaciones no lineales que resulta de la discretización propuesta para las condiciones de frontera no lineales y variables en el tiempo y que evita el uso de nodos ficticios. El modelo fue validado por pruebas experimentales de medición de temperaturas de la superficie del suelo en un terreno de la Sabana de Bogotá entregando buenos resultados de aproximación del modelo a los datos medidos. Con el modelo validado se hizo un análisis de Taguchi para determinar las propiedades ópticas del material que producen la mayor temperatura del suelo.

ABSTRACT

In this paper heat transfer in soil covered with plastic mulch is modeled, having meteorological conditions as inputs. The heat equation is solved for the temperature profile using a backward finite differences method and the Newton-Raphson multidimensional method is used to solve the system of non-linear equations resulting from the proposed handling of the non-linear time variant boundary conditions. The model was validated by experimental field tests measuring soil surface temperature, giving good approximation to the measured data. A Taguchi analysis was performed with the model to find the optimal optical properties of the plastic film in order to increase soil temperature.

Palabras clave: acolchado plástico, ecuación del calor, diferencias finitas, condiciones de frontera no lineales, radiación atmosférica

LISTA DE SÍMBOLOS

τ_l	Transmisividad a onda larga del plástico	plástico y el ambiente [W/m ² K]
ρ_l	Reflectividad a onda larga del plástico	R_s Radiación solar directa y difusa [W/m ²]
τ_s	Transmisividad a radiación solar del plástico	R_a Radiación atmosférica de onda larga [W/m ²]
ρ_s	Reflectividad a radiación solar del plástico	T_a Temperatura del aire ambiente [K]
ϵ_m	Emisividad del plástico	v Velocidad del viento [m/s]
ϵ_s	Emisividad de la superficie del suelo	T_m Temperatura de la película de plástico [K]
a_s	Albedo del suelo, $a_s = 0.2$	T_s Temperatura de la superficie del suelo [K]
α	Difusividad térmica del suelo [m ² /s]	T_i^n Temperatura del i -ésimo nodo en el tiempo
k	Conductividad térmica del suelo [W/m K]	n [K]
C	Calor específico por unidad de volumen del suelo [J/m ³ K]	\dot{q} Flujo de calor [W/m ²]
h_i	Coefficiente de transferencia de calor entre el suelo y el plástico [W/m ² K]	σ Constante de Boltzmann, 5.67×10^{-8} W/m ² K ⁴
h_o	Coefficiente de transferencia de calor entre el	

1 INTRODUCCIÓN

Entre las técnicas de cultivos que se han desarrollado en el mundo se encuentra el acolchado (también conocido como *mulching* por su nombre en inglés) que consiste en cubrir el suelo del cultivo con materiales que sirvan para aumentar su temperatura, retener calor y modificar algunas de sus

propiedades para causar un mejor crecimiento y mayor calidad de las plantas sembradas.

El uso de acolchados plásticos ha tenido gran auge en las últimas décadas debido a sus ventajas, como la retención de la humedad, el aumento de temperatura y almacenamiento de energía térmica; los acolchados plásticos posibilitan

mejoras en la fertilidad de los suelos y en algunos casos impiden el crecimiento de malezas que compiten por agua y nutrientes con las plantas del cultivo (Valenzuela & Castillo, 1999).

En el mundo se han realizado algunos trabajos de investigación que modelan la influencia de diversos factores meteorológicos o del plástico utilizado para el acolchado en la distribución de temperaturas bajo el suelo; sin embargo, los trabajos presentan diferencias entre modelado y simulación, algunos no analizan de forma correcta los flujos de calor por radiación (Misle & Norero 2001) ya que no tienen en cuenta las infinitas reflexiones entre la película plástica y la superficie del suelo, y otros resuelven por separado las temperaturas de las fronteras y las temperaturas de los nodos bajo la superficie (Wu et al. 1996) en una solución explícita-implícita que no es la más adecuada puesto que las condiciones de frontera en la superficie influyen mucho en la solución y por ello deben tratarse integralmente dentro del método numérico y no aparte del resto de los nodos.

Lo anterior muestra la necesidad de desarrollar un modelo de solución integral del problema que trate de forma correcta los flujos de calor de las condiciones de frontera y que sea validado por pruebas experimentales.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar una solución al modelo mediante diferencias finitas que integre las condiciones de frontera dentro de la solución de los demás nodos para la transferencia de calor transitoria en el suelo acolchado, evitando el uso de nodos ficticios y la fragmentación de la solución numérica.

2 MODELO FÍSICO

2.1 Ecuación del calor

Por las condiciones de simetría geométrica y de flujo de calor de los acolchados en los cultivos y a la baja difusividad térmica del suelo se considera que el calor se mueve únicamente hacia las capas inferiores del suelo en la región acolchada, como en los modelos de Wu (1996), Misle (2001) y Mahrer (1981).

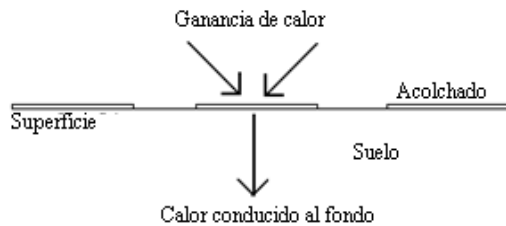


Figura 1. Esquemático de los flujos de calor en la superficie del suelo.

Debido a que la película plástica retiene la humedad, esta se considera constante en todo el dominio de solución, además, para la profundidad máxima de 1.00 m que se considera para el modelo la composición del suelo utilizado en los cultivos no varía notablemente, por lo cual la conductividad térmica y el calor específico del suelo no varían en el tiempo considerado para simulación ni en posición. La ecuación del calor en la dirección z , definida positiva hacia el fondo del suelo y siendo $z = 0$ en la superficie es

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

Para el suelo α se ha considerado constante del orden de $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. En la ecuación (1) se observa la necesidad de establecer dos condiciones de frontera debido a que la ecuación es de segundo orden en z . Las fronteras más obvias para este caso son la superficie del suelo y el fondo del suelo, cuyas condiciones se definen más adelante.

2.2 Condición de frontera en la superficie del suelo

En la superficie del suelo se presenta flujo de calor debido a la radiación absorbida, la convección con el aire atrapado entre la cubierta plástica y el suelo y la conducción hacia las capas inferiores del suelo. Se considera que la superficie del suelo no almacena calor sino que lo transmite todo hacia el fondo por conducción, entonces el balance de energía sobre la superficie del suelo es:

$$\dot{q}_{cond} + \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} = 0 \quad (2)$$

El flujo de calor por conducción hacia las capas inferiores del suelo viene dado por la ecuación de Fourier:

$$\dot{q}_{cond} = -k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (3)$$

Para calcular el flujo de calor por convección entre la superficie del suelo y el aire atrapado se utilizó la ecuación de Garzoli y Blackwell, validada por sus autores luego de 18 experimentos bajo diferentes condiciones climáticas:

$$\dot{q}_{conv} = h_i (T_m - T_s) \quad (4)$$

Donde experimentalmente se determinó que $h_i = 7.2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ para diferentes condiciones meteorológicas. El flujo de calor neto por radiación sobre la superficie del suelo es la suma de la irradiación solar y difusa de onda corta neta, la radiación atmosférica de onda larga neta, la pérdida por emisión neta de radiación del suelo, y la radiación neta recibida por la emisión del acolchado plástico, donde debe tenerse en cuenta las infinitas reflexiones entre el suelo y la cubierta plástica (Wu et al., 1996). Considerando el espacio entre la superficie del suelo y el plástico del acolchado, con la ayuda de un diagrama de rayos (Figura 2) se tiene que la radiación neta de onda corta que absorbe la superficie del suelo es:

$$R_{sn} = \tau_s R_s (1 - a_s) \sum_{n=0}^{\infty} (\rho_s a_s)^n \quad (5)$$

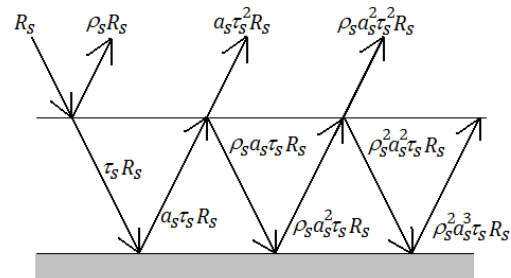


Figura 2. Reflexiones de la radiación de onda corta sobre la superficie del suelo.

Como $\rho_s a_s < 1$ la serie geométrica converge a:

$$R_{sn} = \frac{\tau_s(1-a_s)}{1-\rho_s a_s} R_s \quad (6)$$

La radiación atmosférica de onda larga neta sobre la superficie del suelo, la radiación neta sobre el suelo debida a la emisión del plástico y la radiación neta perdida por emisión de la superficie del suelo se derivan de forma similar, entregando el flujo de calor por radiación neto sobre el suelo:

$$\dot{q}_{rad} = \frac{\tau_s(1-a_s)}{1-\rho_s a_s} R_s + \frac{\epsilon_s \sigma}{1-\rho_l + \rho_l \epsilon_s} [\tau_l \epsilon_{sky} T_a^4 + \epsilon_m T_m^4 - (1-\rho_l) T_s^4] \quad (7)$$

La radiación atmosférica de onda larga se calcula utilizando la fórmula de Swinbank para cielo claro:

$$R_a = \epsilon_{sky} \sigma T_a^4 \\ \epsilon_{sky} = 9.2 \times 10^{-6} T_a^2 \quad (8)$$

2.3 Condición de frontera al fondo del suelo

Se define el fondo del suelo como la profundidad z_x a la cual las oscilaciones de temperatura debidas a los ciclos diarios del flujo de calor son prácticamente nulas, en otras palabras, la profundidad a la cual la temperatura permanece constante en un valor T_x a lo largo del tiempo. Lo anterior es un modelo realista debido a que el suelo tiene una capacidad térmica muy grande respecto a los flujos de calor presentes en el caso modelado. La condición de frontera en este caso es:

$$T(t, z_x) = T_x \quad (9)$$

El valor de z_x puede estimarse de acuerdo a mediciones hechas por distintas investigaciones. El valor de z_x hallado por Mistle fue de $z_x = 30$ cm y por Wu fue de 80 cm. Para una mayor certeza en el análisis, en el presente trabajo se toma el valor para el fondo del suelo de $z_x = 1$ m.

2.4 Condición de frontera en la cubierta plástica

De las ecuaciones (4) y (7) se observa que las condiciones de frontera sobre la superficie del suelo dependen de la temperatura de la cubierta plástica, por lo cual es necesario conocer ésta en cada instante del tiempo. Se considera que el flujo de calor sobre la cubierta plástica se da únicamente por radiación y por convección debido a que ésta solo hace contacto con el suelo en los extremos y hay una capa de aire atrapado entre el suelo y el plástico; además, como las películas plásticas son muy delgadas (del orden de centésimas de milímetro) se considera que el plástico es una superficie y no almacena energía, entonces el balance de energía es

$$\dot{q}_{conv,m} + \dot{q}_{rad,m} = 0 \quad (10)$$

Hay dos términos de convección, uno interno entre el aire atrapado entre el suelo y el plástico y otro externo entre el plástico y el ambiente. Para la convección interna se utiliza la ecuación de Garzoli y Blackwell:

$$\dot{q}_{conv1} = h_i(T_s - T_m) \quad (11)$$

Para la convección externa se utiliza otra correlación hallada por Garzoli y Blackwell:

$$\dot{q}_{conv2} = h_o(T_a - T_m) \quad (12)$$

Donde $h_o = 7.2 + 3.8v$ en W/m^2K con v en m/s. Se tiene entonces que el total del flujo de calor por convección sobre la cubierta plástica es:

$$\dot{q}_{conv,m} = h_i(T_s - T_m) + h_o(T_a - T_m) \quad (13)$$

El análisis para calcular el flujo de calor por radiación neto sobre la cubierta plástica es similar al que se hizo para la superficie del suelo. El resultado es:

$$\dot{q}_{rad,m} = \left[1 - \rho_s - \frac{\tau_s(1-a_s+\tau_s a_s)}{1-\rho_s a_s} \right] R_s + \left[1 - \rho_l - \frac{\tau_l(\tau_l + \epsilon_s(1-\tau_l))}{1-\rho_l + \rho_l \epsilon_s} \right] \epsilon_{sky} \sigma T_a^4 - \left[2 - \frac{(1-\epsilon_s)(1-\tau_l-\rho_l)}{1-\rho_l + \rho_l \epsilon_s} \right] \epsilon_m \sigma T_m^4 + \left[1 - \frac{\tau_l + \rho_l}{1-\rho_l + \rho_l \epsilon_s} \right] \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (14)$$

3 SOLUCIÓN NUMÉRICA

Para la solución numérica se utilizó un método de diferencias finitas regresivo (o *implícito*) para la discretización de la ecuación del calor y la discretización de las condiciones de frontera. Se utiliza éste método debido a que es incondicionalmente estable para los tamaños de paso en tiempo y posición, por lo cual sirve para análisis segundo-a-segundo o por horas; el algoritmo se recomienda para pasos de tiempo de 5 min y pasos de tamaño de 1 cm, que fue donde se presentó convergencia. La discretización de la ecuación (1) es:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \alpha \frac{T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1}}{\Delta z^2} \quad (15)$$

Reordenando los términos de tal forma que se igualen a cero se tiene:

$$-Fo T_{i-1}^{n+1} + (1 + 2Fo) T_i^{n+1} - Fo T_{i+1}^{n+1} - T_i^n = 0 \quad (16)$$

Donde $Fo = \alpha \Delta t / \Delta z^2$ es el número de Fourier. La ecuación (15) es válida para $i = 2, 3, \dots, M-1$ donde M es el número de nodos de posición. El balance de energía discretizado sobre la superficie del suelo es:

$$k \frac{T_1^{n+1} - T_s^{n+1}}{\Delta z} + h_i(T_m^{n+1} - T_s^{n+1}) + \frac{\tau_s(1-a_s)}{1-\rho_s a_s} R_s^{n+1} + \frac{\epsilon_s \sigma}{1-\rho_l + \rho_l \epsilon_s} [\tau_l \epsilon_{sky} (T_a^{n+1})^4 + \epsilon_m (T_m^{n+1})^4] - \frac{\epsilon_s \sigma}{1-\rho_l + \rho_l \epsilon_s} (1-\rho_l) (T_s^{n+1})^4 = 0 \quad (17)$$

La discretización de la condición de frontera al fondo del suelo es sencillamente:

$$T_M^{n+1} - T_M^n = 0 \quad (18)$$

El balance de energía discretizado sobre el plástico es:

$$\begin{aligned}
& h_i(T_s^{n+1} - T_m^{n+1}) + h_o^{n+1}(T_a^{n+1} - T_m^{n+1}) + \\
& \left[1 - \rho_s - \frac{\tau_s(1-a_s+\tau_s a_s)}{1-\rho_s a_s}\right] R_s^{n+1} \\
& + \left[1 - \rho_l - \frac{\tau_l(\tau_l+\epsilon_s(1-\tau_l))}{1-\rho_l+\rho_l\epsilon_s}\right] \epsilon_{sky} \sigma (T_a^{n+1})^4 \\
& - \left[2 - \frac{(1-\epsilon_s)(1-\tau_l-\rho_l)}{1-\rho_l+\rho_l\epsilon_s}\right] \epsilon_m \sigma (T_m^{n+1})^4 + \\
& \left[1 - \frac{\tau_l+\rho_l}{1-\rho_l+\rho_l\epsilon_s}\right] \epsilon_s \sigma (T_s^{n+1})^4 = 0
\end{aligned} \quad (19)$$

Como se observa de las ecuaciones (16), (17), (18) y (19), todas las temperaturas son interdependientes a cada instante, por lo cual debe resolverse un sistema no-lineal de ecuaciones en cada paso de tiempo. El perfil de temperaturas en cada instante está dado por un vector columna \mathbf{T} de $M+2$ elementos, definido como:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_m^{n+1} \\ T_s^{n+1} \\ T_1^{n+1} \\ T_2^{n+1} \\ \vdots \\ T_{M-1}^{n+1} \\ T_M^{n+1} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Se define una función vectorial $\mathbf{F}(\mathbf{T})$ de acuerdo al balance de energía en cada nodo:

$$\mathbf{F}(\mathbf{T}) = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ \vdots \\ F_{M+1} \\ F_{M+2} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Donde F_1 viene dado por el miembro derecho de la ecuación (19), F_2 por el miembro derecho de la ecuación (17), F_{i+2} por el miembro derecho de la ecuación (16) para $1 < i < M-1$ y F_{M+2} por el miembro derecho de la ecuación (18). Entonces, el perfil de temperaturas se resuelve utilizando el método de Newton-Raphson multidimensional para el sistema de ecuaciones $\mathbf{F}(\mathbf{T}) = \mathbf{0}$ por la iteración:

$$\mathbf{T}^{k+1} = \mathbf{T}^k - J(\mathbf{T}^k)^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{T}^k) \quad (22)$$

Donde J es el jacobiano del sistema, dado por:

$$J_{i,j} = \frac{\partial F_i}{\partial T_j} \quad (23)$$

La aproximación inicial de cada iteración dada por la ecuación (22) se toma como el perfil de temperaturas en el paso de tiempo inmediatamente anterior. Para cada paso de tiempo se hace la iteración (22) hasta que se obtiene convergencia y el \mathbf{T} final es el perfil de temperaturas en ese paso de tiempo. La inversión de la matriz jacobiana se hace por medio del método SOR. La solución numérica se programó en un algoritmo en MATLAB que entrega como

resultado una matriz donde los renglones representan cada nodo de posición y las columnas cada instante de tiempo.

4 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para la validación del modelo se construyeron dos acolchados plásticos de polietileno de baja densidad (LDPE) en un terreno de cultivo de flores en la Sabana de Bogotá. Luego de caracterizar las propiedades ópticas del plástico y las propiedades térmicas del suelo se procedió a tomar simultáneamente datos meteorológicos con la estación meteorológica portátil Casella NOMAD y temperaturas del suelo con un termopar digital.

4.1 Caracterización del plástico

Para la caracterización óptica del plástico se utilizaron los equipos de espectrofotometría NICOLET 380 FTIR para el infrarrojo y Perkin Elmer Lambda 3 UV/VIS para el rango ultravioleta a visible.

Tabla 1. Propiedades ópticas del plástico a onda larga.

τ_l	ρ_l	ϵ_m
0.6	0.398	0.002

Tabla 2. Propiedades ópticas del plástico a onda corta.

τ_s	ρ_s	a_s
0.733	0.265	0.001

4.2 Validación del modelo

Se tomó la temperatura en la superficie del suelo acolchado con un termopar OMEGA 871A de NiCr-NiAl, al mismo tiempo que la estación meteorológica portátil Casella NOMAD tomaba datos del clima. El suelo sobre el terreno tenía conductividad térmica de 2.2W/mK y calor específico por unidad de volumen del orden de $10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ según pruebas de calorimetría realizadas con una resistencia eléctrica de 75 W y el termopar introduciendo calor durante 30 min y tomando la temperatura final. Los datos de entrada independientes del modelo fueron tomados por la estación meteorológica y se muestran en las Figuras 3 a 5.

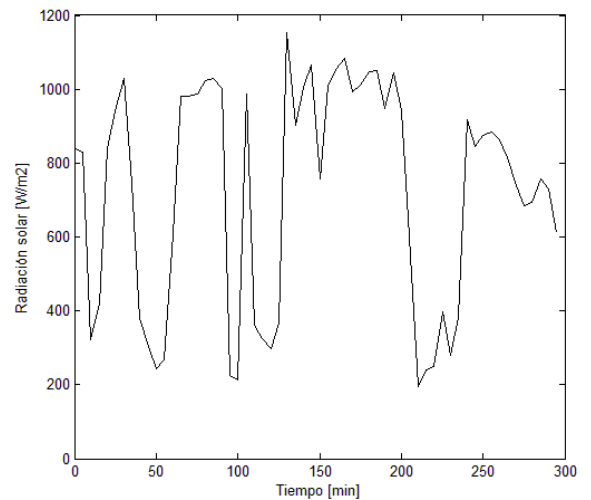


Figura 3. Radiación solar medida en W/m^2 .

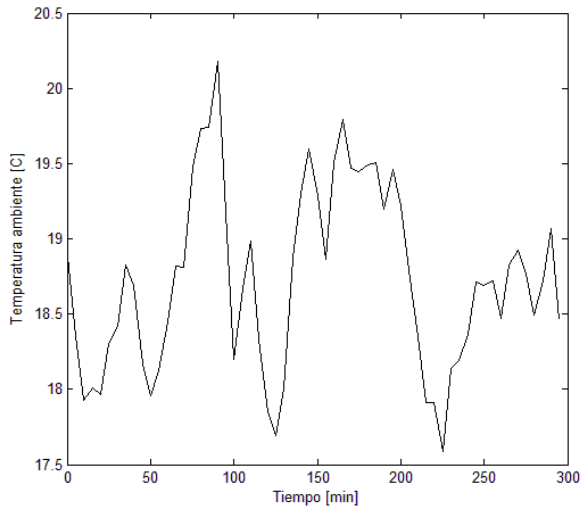


Figura 4. Temperatura del aire medida en °C.

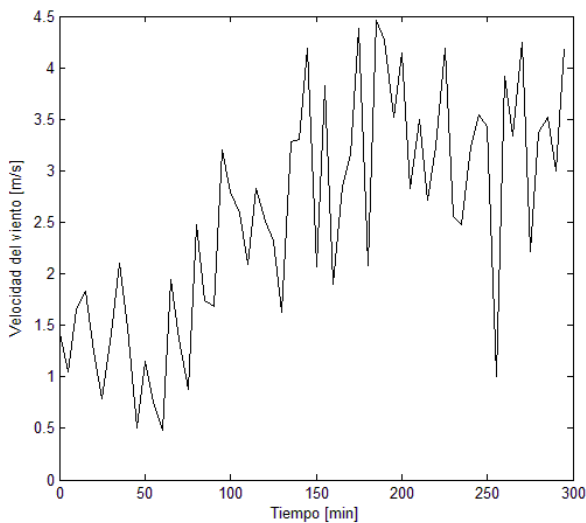


Figura 5. Velocidad del viento medida en m/s.

Los datos fueron tomados cada 5 min entre las 09:45 y las 14:40 del 5 de diciembre de 2008, en un terreno de la Sabana de Bogotá cercano al peaje de Siberia, Cundinamarca. Las condiciones iniciales se interpolaron linealmente de la temperatura inicial de la superficie de 41.2°C y la temperatura a 1 m de profundidad de 15°C como una forma práctica de aproximación, las simulaciones con estas condiciones iniciales mostraron ser cercanas a los datos medidos (Fig. 6). El promedio del error relativo de los datos simulados respecto a los datos medidos fue de 5.26% y el error máximo obtenido fue de 16% en una única medición.

Hay que hacer notar que la estación meteorológica entrega un promedio de 5 min de datos, por lo cual es muy probable que los errores vistos cuando hay cambios

abruptos de radiación solar sean debidos a la forma de adquisición de datos y no a un error del modelo en sí.

El tamaño de paso en tiempo para las simulaciones fue de 300 s y el tamaño de paso para la posición fue de 0.01 m.

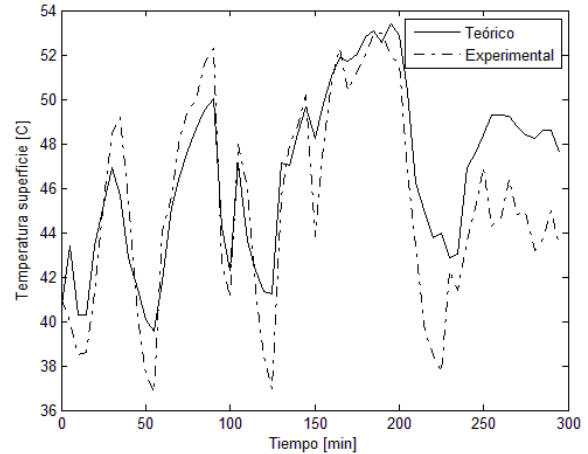


Figura 6. Comparación entre los datos medidos y teóricos.

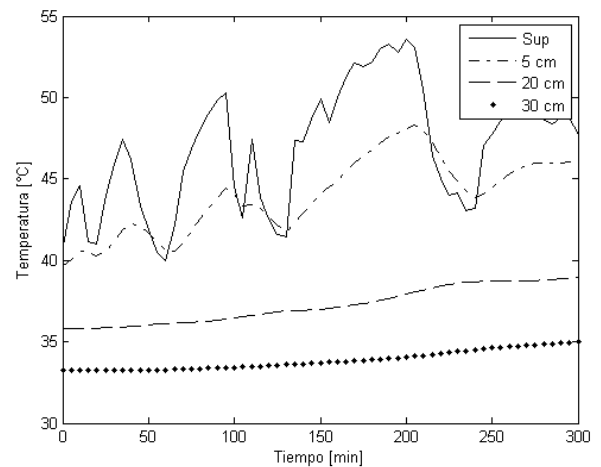


Figura 7. Temperaturas simuladas a distintas profundidades para el tiempo de medición.

Las simulaciones muestran que la temperatura permanece prácticamente constante para el tiempo simulado a profundidades mayores a 30 cm, lo que corresponde a los datos para el fondo de Mistle. Se observa el aplanamiento de la onda de respuesta a medida que se adentra más dentro del suelo, debido a su capacidad de almacenamiento térmico.

5 ANÁLISIS DE TAGUCHI CON EL MODELO

Se realizó un análisis estilo Taguchi para observar la respuesta de la temperatura de la superficie del suelo a las propiedades del plástico. Como entradas del modelo se utilizaron datos meteorológicos reales de 48 horas medidos por la estación Casella NOMAD en Bogotá y las propiedades del suelo de la validación.

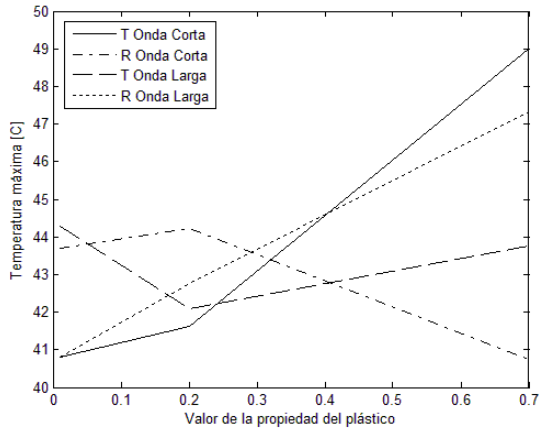


Figura 8. Análisis de diseño robusto para las propiedades del plástico.

El análisis de diseño robusto se hizo para obtener la mayor temperatura de la superficie del suelo (Fig. 8) con siete combinaciones de propiedades ópticas, y mostró la combinación óptima de propiedades del plástico para calentar el suelo que se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Combinación óptima de propiedades para obtener la mayor temperatura del suelo.

τ_s	0.7
ρ_s	0.2
τ_l	0.01
ρ_l	0.7

Los valores de las propiedades del plástico no son exactamente los mismos de la Tabla 3 pero sí deben estar cercanos. El material que más se acerca a la combinación óptima hallada (de hecho, concuerda con la segunda combinación óptima) es el LDPE transparente, lo cual es coherente con los resultados experimentales de Misle.

6 CONCLUSIONES

El modelo unidimensional desarrollado para la transferencia de calor bajo el suelo con acolchados plásticos produce una buena aproximación a los datos experimentales, por lo cual se infiere que el modelo es útil para predicciones de temperatura bajo diferentes tipos de acolchados plásticos y para selección de los mismos.

Bajo un análisis de Taguchi realizado se encontró que el material que posee la combinación de propiedades más cercana a la óptima hallada es el LDPE, lo cual concuerda con los resultados experimentales de Misle y con la experiencia del agro que utiliza ese material como acolchado para calentar el suelo.

De acuerdo al análisis de diseño robusto, se deduce que el material utilizado actualmente para aumentar la temperatura del suelo no es el óptimo y podría desarrollarse un material que posea la combinación óptima de propiedades.

La utilización del método de Newton-Raphson multidimensional facilita el manejo de las condiciones de

frontera en el algoritmo numérico y evita el uso de más nodos que los necesarios ya que no se requiere de nodos ficticios, además, evita problemas de convergencia puesto que el algoritmo ha sido probado con pasos de 1 s, 5 min y 1 h entregando resultados muy cercanos en todos los casos.

AGRADECIMIENTOS

A David Uribe de Bedout por facilitar el uso del terreno y las películas plásticas, necesarios para las pruebas experimentales.

REFERENCIAS

Bilbao, J. and De Miguel, A.. 2007. Estimation of Daylight Downward Longwave Atmospheric Irradiance under Clear-Sky and All-Sky Conditions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 46: 878-889.

Dobos, Endre. Albedo, *Encyclopedia of Soil Science*. <http://www.informaworld.com/smpp/content~content=a740179547~db=all~order=date>

Garzoli, K. V. and Blackwell, J., 1981. An analysis of the nocturnal heat loss from a single skin plastic greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.*, 26: 203-214.

Mills, Anthony. *Transferencia de Calor*. 1ª Edición. Mc Graw Hill. P. 932.

Misle A., Enrique y Norero Sch., Aldo. Comportamiento térmico del suelo bajo cubiertas plásticas: I. Efecto de diferentes tipos de láminas. *Agricultura Técnica*. Oct. 2001, vol. 61, no. 4, p. 488-499.

Misle A., Enrique y Norero Sch., Aldo. Comportamiento térmico del suelo bajo cubiertas plásticas: II. Efecto del polietileno transparente a diferentes profundidades. *Agricultura Técnica*. Ene. 2002, vol. 62, no. 1, p. 133-142.

Misle A., Enrique y Norero Sch., Aldo. Comportamiento térmico del suelo bajo cubiertas plásticas: III. Simulación. *Agricultura Técnica*. Jul. 2002, vol. 62, no. 3, p. 427-438.

Valenzuela, P. y Castillo H.. Acolchado de suelos mediante filmes de polietileno. *Revista el Agroecológico de la Fundación Chile*. Mayo de 1999.

Wu et al. 1996. Estimating temperature of mulched and bare soil from meteorological data. *Agric. for Meteorol.* 81: 299-323.