

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL SUELO BAJO CUBIERTAS PLÁSTICAS II. EFECTO DEL POLIETILENO TRANSPARENTE A DIFERENTES PROFUNDIDADES¹

**Soil thermal response under plastic covers
II. Effect of transparent polyethylene at different depths**

Enrique Misle A.² y Aldo Norero Sch.³

A B S T R A C T

During November of 1996, an experiment was carried out at the Universidad Católica del Maule, Talca (35°26' S lat, 71°26' W long.) in a Haplanthrepts soil, to determine the soil thermal response under a transparent polyethylene cover (50 μ) at 1, 3, 7 and 15 cm depth, as well as the transversal thermal response (phases 2, 3 and 5). Phases 1 and 4, the effect of four plastic covers on the soil temperature at 7cm depth was informed in a previous paper. Tukey's test was applied ($P \leq 0.05$) to the thermal amplitude in order to verify the reliability of the results. Its value increased about 10 °C up to 7 cm depth, showing that it is possible to solarize at this latitude, with a mean temperature of 36 °C at 7 cm depth, and with possibly lethal maximums at depths of 7 to 15 cm after 15 days treatment. Phase 5 revealed that there is a thermal decrease toward the borders of the film cover, showing a central area of 20-30 cm where the temperature is uniform. The information obtained is useful to verify a model that describes the thermal conduct of soil under a plastic cover.

Key words: soil temperature, mulch.

R E S U M E N

Durante noviembre de 1996 se realizó un experimento en la Universidad Católica del Maule, Talca (35°26' lat. Sur, 71°26' long. Oeste), en un suelo Haplanthrepts, para determinar la conducta térmica del suelo bajo una cubierta de polietileno transparente (50 μ) a 1, 3, 7 y 15 cm de profundidad, así como el comportamiento térmico transversal (fases 2, 3 y 5). En las fases 1 y 4 se determinó el efecto de cuatro cubiertas plásticas sobre la temperatura del suelo a 7 cm de profundidad, informado en un trabajo anterior. Se realizó la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$) para la amplitud térmica con el fin de constatar la confiabilidad de los resultados. Su valor se incrementó alrededor de 10 °C hasta 7 cm de profundidad, mostrando que es posible solarizar en esta latitud, con temperatura media sobre 36 °C hasta 7 cm, y con máximas posiblemente letales hasta un punto situado entre 7 y 15 cm de profundidad, después de 15 días de tratamiento. La fase 5 reveló que existe una disminución térmica hacia los extremos del acolchado, mostrando un área central de 20-30 cm donde la temperatura es uniforme. La información obtenida es de utilidad para verificar un modelo que describa la conducta térmica del suelo bajo una cubierta plástica.

Palabras clave: temperatura del suelo, acolchado.

¹Recepción de originales: 9 de diciembre de 2000.

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

³Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Escuela de Agronomía, Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile.

INTRODUCCIÓN

Las cubiertas plásticas producen un efecto térmico en el suelo muy diferente a la práctica del acolchado (mulch) orgánico que le dio origen. Debido a que las cubiertas no porosas anulan el componente de evaporación, transmiten una parte importante de la radiación solar al interior del suelo. Suelen elevar así la temperatura, permitiendo aplicaciones como acolchado para anticipar cosechas y otras como la solarización, donde se extrema la posibilidad de incrementar la temperatura hasta niveles letales para muchos de los organismos vivos del suelo (Pullman *et al.*, 1981). En franjas angostas se debe considerar la disminución de temperatura hacia los extremos, llamada efecto borde (Grinstein *et al.*, 1995).

La utilización de cubiertas plásticas supone alterar el balance de radiación, definiendo según el objetivo, un resultado más positivo o más negativo, el cual puede expresarse en mayor o menor temperatura en el suelo (Contreras *et al.*, 1992). La temperatura del suelo se manifiesta como resultado del balance energético que inicialmente se expresa como balance de radiación. A partir de la radiación solar global incidente, Q_g , más la consideración de la radiación neta de onda larga, constituida por la terrestre y la atmosférica, Q_s y Q_l , respectivamente, se define la radiación neta, Q_n :

$$Q_n = Q_g (1 - \alpha) + Q_l - Q_s \quad [1]$$

donde α es el albedo del suelo o fracción en que Q_g es reflejada. Q_n ofrece así energía disponible para el proceso químico de la fotosíntesis, F , para evaporación, E , y para el calentamiento del suelo, G , de la vegetación, C , y del aire, H . El balance de energía se expresa del siguiente modo:

$$Q_n + H + C + G + \lambda E + \gamma F = 0 \quad [2]$$

donde γ es el equivalente calórico por la fijación del anhídrido carbónico y λ es el calor latente de vaporización. Desde el punto de vista del suelo, existe entonces un flujo de calor y un flujo de

vapor, determinado por el balance de energía. El flujo de calor, G , puede ser expresado, de acuerdo a la ley de Fourier como resultado de un gradiente térmico entre dos puntos ($\delta T / \delta z$), cuando T es la temperatura y z la profundidad, afectado por una resistencia al flujo, cuyo recíproco es la conductividad térmica, η (Campbell, 1985; Auvermann *et al.*, 1992):

$$G = \eta (\delta T / \delta z) \quad [3]$$

Si se supone que el flujo de calor ocurre sólo en una dirección vertical, z , entonces a partir de [3] puede formularse la ecuación diferencial dependiente del tiempo, t , conocida como la ecuación general de flujo de calor en el suelo, donde ζ es la capacidad calórica (Sellers, 1965; Campbell, 1985):

$$\zeta (\delta T / \delta t) = \delta / \delta z (\eta \delta T / \delta z) \quad [4]$$

La ecuación [4] describe la temperatura del suelo como función de la profundidad y del tiempo, la cual supone un suelo uniforme e infinitamente profundo; no obstante, no se conocen soluciones analíticas específicas. Campbell (1985) presentó una solución a la ecuación [4] para lo cual divide el suelo en elementos o capas y nodos. Diversos investigadores han recogido este método de manera que el problema de describir el flujo de calor en el suelo y conocer la temperatura en un momento dado y a una profundidad dada puede considerarse resuelto, y hoy sólo se modifican las diversas proposiciones, analíticas o numéricas para las ecuaciones de flujo de calor en el suelo (Sellers, 1965; Gutkowski y Terranova, 1991; Auvermann *et al.*, 1992; Ham y Kluitenberg, 1994). No obstante, son escasos los trabajos de investigación que reportan registros de temperatura bajo diferentes cubiertas plásticas dentro del perfil del suelo. En Chile la situación es similar (Contreras *et al.*, 1992). Anteriormente se describió el efecto que producen diferentes tipos de cubiertas plásticas (Misle y Norero, 2001); en este artículo se describen los resultados del ensayo del comportamiento térmico a diferentes profundidades de suelo cubierto con polietileno

(PE) transparente. Se espera así, estudiar la temperatura del suelo en profundidad modificada por una cubierta plástica para formular sus efectos a partir de la ecuación general de flujo de calor en el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante noviembre de 1996 se estableció un ensayo de campo en el Campus San Miguel de la Universidad Católica del Maule, en la ciudad de Talca (35°26' lat. S., 71°26' long. Oeste, alt. 110 m.s.n.m), en un suelo Haplanthreps, bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro profundidades como tratamientos (1, 3, 7 y 15 cm), y cuatro repeticiones, comparando el PE transparente (TRA) 50 μ , con el suelo descubierto (SUE). El ensayo se organizó en cinco fases, cubriendo un período total de 38 días, de los cuales este artículo da cuenta de las fases 2, 3 y 5. La Fase 1, comportamiento térmico bajo tres láminas plásticas (TRA; bicolor blanco/negro, OPA; café, CAF) y suelo descubierto (SUE) con medición de temperatura a 7 cm de profundidad fue informada previamente (Misle y Norero, 2001). La Fase 2, comportamiento térmico con medición de temperatura a cuatro profundidades: 1, 3, 7 y 15 cm en el tratamiento SUE; Fase 3, comportamiento térmico con medición de temperatura a cuatro profundidades: 1, 3, 7 y 15 cm en el tratamiento TRA; Fase 4, comparación de PE naranja (NAR) con CAF con medición de temperatura a 3 y 7 cm de profundidad; y Fase 5, evaluación de movimiento térmico transversal de calor bajo TRA. Los cambios de fase se realizaron sin remover las láminas plásticas, ni la condición original de la superficie del suelo con el objeto de no alterar los efectos acumulativos de los tratamientos.

En el centro de cada bloque un soporte blanco de madera portaba cuatro cilindros protectores blancos ubicados a 20, 40, 80 y 160 cm sobre la superficie del suelo, los que contuvieron los termómetros de máxima y mínima. Desde cada posición un cable con sensor de temperatura se ubicó en la posición necesaria en el suelo para

cada bloque o cada profundidad de acuerdo a las fases del ensayo. Una de las repeticiones incluyó tensiómetros en los cuatro tratamientos y tres de ellas llevaron bloques de Bouyoucos en dos tratamientos: transparente y testigo. Durante todo el período se midió además, la temperatura del aire, máxima, mínima y actual a la hora de registro, a 20, 40, 80 y 160 cm sobre la superficie del suelo. En una unidad independiente de los tratamientos se ubicaron el termómetro y el tensiómetro de profundidad a 30 cm.

En términos sintéticos, las fases 2 y 3 tuvieron un diseño formal representado por cuatro profundidades como tratamientos y cuatro repeticiones, así como para la fase 5 correspondieron cuatro posiciones desde el centro del mulch con sus equivalentes repeticiones. El ensayo está descrito con mayor detalle en otro artículo (Misle y Norero, 2001). Se realizó la prueba de Tukey para constatar la confiabilidad de los resultados.

Efecto del PE TRA a diferentes profundidades

En el centro de los tratamientos testigo y PE transparente (TRA) se insertó un dispositivo construido con tubería de PVC hidráulico clase 10 de 20 mm de diámetro cortada longitudinalmente. Una mitad fue perforada para ubicar a través de ella cuatro sensores (termistores) de termómetros de máxima y mínima (-40 + 50 °C) a la distancia deseada en el suelo (1, 3, 7 y 15 cm). Cada extremo sensor fue adherido con silicona, incluyendo vainas protectoras y todo el conjunto quedó cerrado por la contraparte del tubo. Este artefacto fue probado, construyendo un modelo físico que en lugar de los sensores tuvo trozos metálicos del mismo diámetro. Se enterró en un recipiente plástico con tierra en forma similar a como se haría en terreno; luego, el recipiente fue congelado y seccionado para verificar la calidad de la ubicación y el contacto que tendrían los sensores con el suelo. La prueba fue satisfactoria.

El montaje de los termómetros debió hacerse en terreno, al momento de retirar los sensores

ubicados para el estudio con diferentes plásticos (Fase 1). Esto se hizo el día 14 de noviembre, después del último registro de la fase anterior. Una vez terminada esta tarea, se ubicaron en su posición, dando por iniciada la Fase 2 al día siguiente (día 0).

Los cilindros de inserción al suelo fueron cambiados de lugar el día 24 de noviembre después de la hora de registro para ser ubicados en el tratamiento PE TRA, iniciando la Fase 3. Las profundidades registradas en ambos tratamientos fueron 1, 3, 7, y 15 cm.

Además, se insertó un termómetro de mercurio para suelo en cada tratamiento de PE TRA para controlar la máxima, que superó el rango de los termómetros digitales en una magnitud de 2 °C aproximadamente al superar 50 °C, por lo que se incorporó la corrección necesaria (Misle, 1998). Se anotó en forma diaria la temperatura máxima, mínima y actual a la hora de registro, es decir, a las 11:00 h, horario de invierno. Esta hora se determinó a partir de los registros anteriores, de modo de registrar a esta hora la máxima del día anterior y la mínima del mismo día en todas las profundidades. Entre los días 6 y 7 de registro del tratamiento testigo se anotó el ciclo diario a intervalos de una hora en el día y dos horas en la noche (21 y 22 de noviembre). Entre los días 3 y 4 de registro en PE transparente se anotó el ciclo diario (28 y 29 de noviembre, Figura 3).

Se instalaron dos capturadores de temperatura en una de las repeticiones para llevar una contraparte de los registros manuales a 3 cm y a 15 cm de profundidad. Esto se hizo tanto para el tratamiento suelo descubierto como PE transparente.

Comportamiento térmico transversal

Al término de las fases 3 y 4, se retiraron los sensores de sus posiciones y se insertaron a 7 cm de profundidad en las siguientes posiciones desde el centro del mulch PE TRA: 0, 10, 30 y 38 cm en cada bloque de repetición, para estudiar el

comportamiento térmico transversal o efecto borde. Se insertó un termómetro de mercurio a la misma profundidad en el centro del camino (65 cm desde el centro del PE). Se anotaron las temperaturas máximas, mínimas y actuales durante tres días.

RESULTADOS

Efecto del polietileno transparente a diferentes profundidades

La evolución de la temperatura máxima y mínima del suelo a diferentes profundidades en el tratamiento suelo descubierto se observa en la Figura 1.

Dado que la temperatura media del día no basta para revelar las diferencias que puedan producirse al intentar comparar el tratamiento con polietileno transparente, se ha elaborado la información para comparar la amplitud térmica en las dos situaciones. La Figura 1(c) representa la amplitud térmica del tratamiento suelo desnudo a diferentes profundidades. Se observa clara consistencia en los resultados. La Figura 2 muestra la situación equivalente para TRA. Debe tenerse presente que en este caso la temperatura máxima a 1 y 3 cm saturó el límite de registro de los termómetros digitales.

En el análisis de la Fase 1, la prueba de hipótesis planteada para la pendiente de cada curva de temperatura acumulada mostró que fueron diferentes el tratamiento TRA del CAF y del SUE y el OPA, sin que pudiera reconocerse diferencia entre estos últimos (Misle y Norero, 2001). En forma similar, se utilizó una prueba sólo para comparar las amplitudes térmicas puesto que se reconoce causalidad; así, como lo relevante es la cuantificación, se realizó la prueba de Tukey para el PE TRA que demostró diferencias entre todas las combinaciones de profundidades, con una significación de 0,05. La probabilidad calculada entre grupos fue 3,267E-012, con un valor F de 193,5.

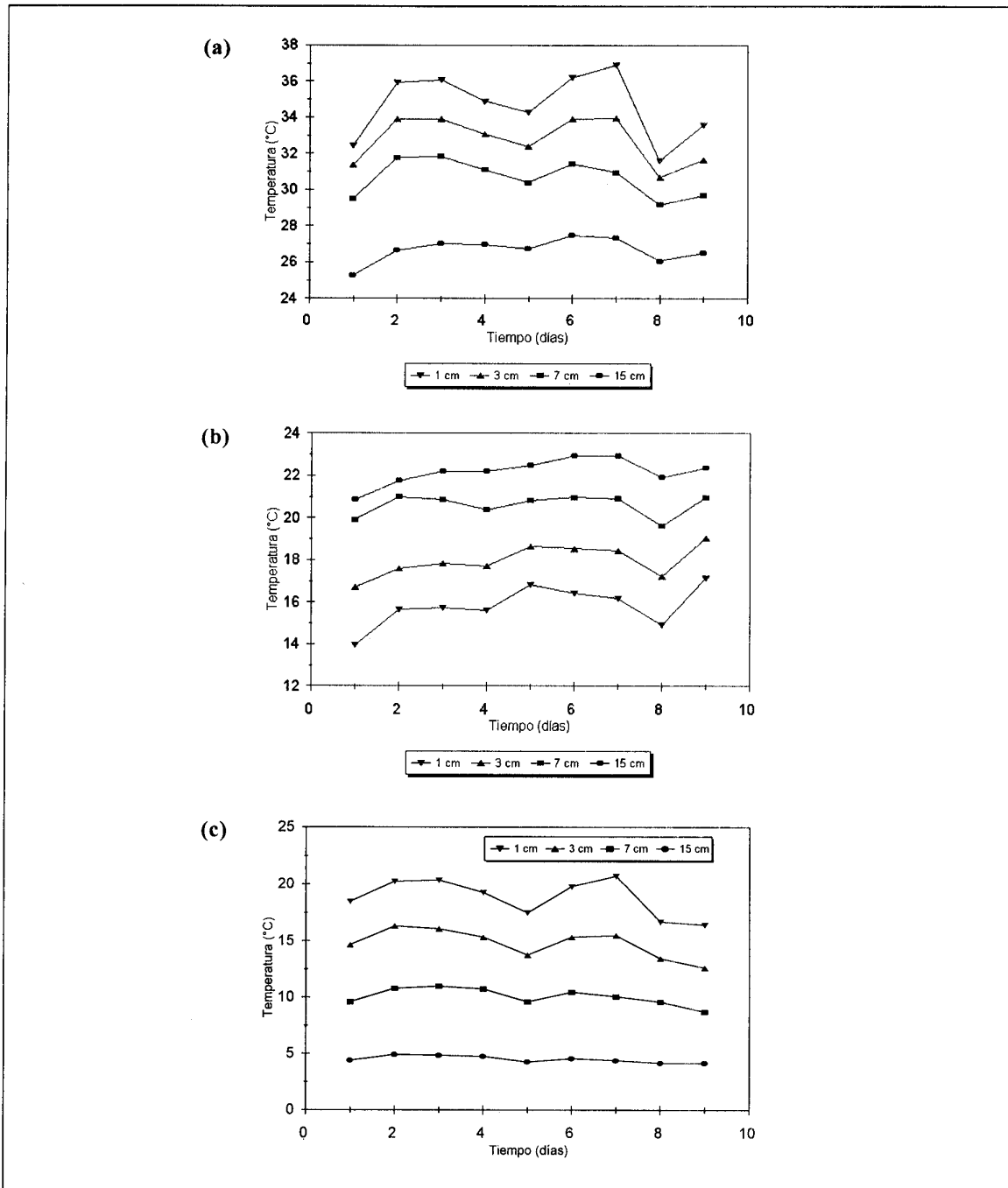


Figura 1. Temperatura del suelo a diferentes profundidades con tratamiento suelo descubierto. Promedio de cuatro repeticiones: (a) Temperatura máxima. Cada valor corresponde a la máxima del día anterior; hora de registro 11:00 h; (b) Temperatura mínima. Cada valor corresponde a la mínima del mismo día de registro a las 11:00 h (c) Amplitud térmica.

Figure 1. Soil temperature at different depths in an uncovered soil treatment. Mean of four replicates: (a) Maximum temperature. Each value is the preceding day's maximum registered at 11:00 h; (b) Minimum temperature. Each value is the same day minimum registered at 11:00 h; (c) Thermal amplitude.

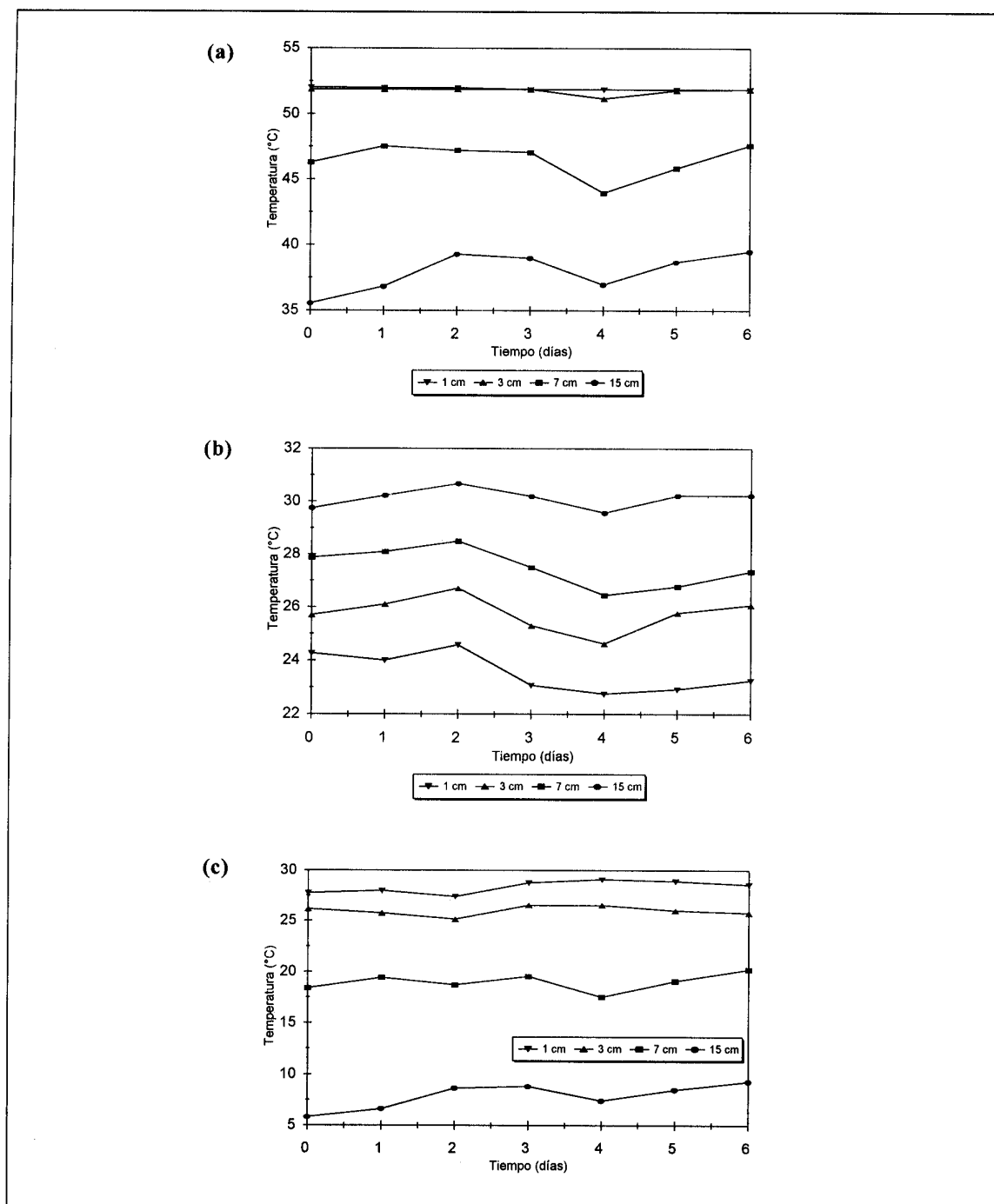


Figura 2. Temperatura del suelo a diferentes profundidades con tratamiento polietileno (PE) transparente. Promedio de repeticiones. (a) Temperatura máxima; (b) Temperatura mínima; (c) Evolución de la amplitud térmica media corregida en valores máximos.

Figure 2. Soil temperature at different depths with transparent polyethylene (PE) treatment. Means of replicates. (a) Maximum temperature; (b) Minimum temperature; (c) Evolution of thermal amplitude with correction for maximum values.

Por último, en la Figura 3 se compara el PE transparente con relación al suelo descubierto a las cuatro profundidades durante un ciclo diario completo.

Efecto borde

Se estudió la distribución de la temperatura en forma transversal puesto que es parte del inte-

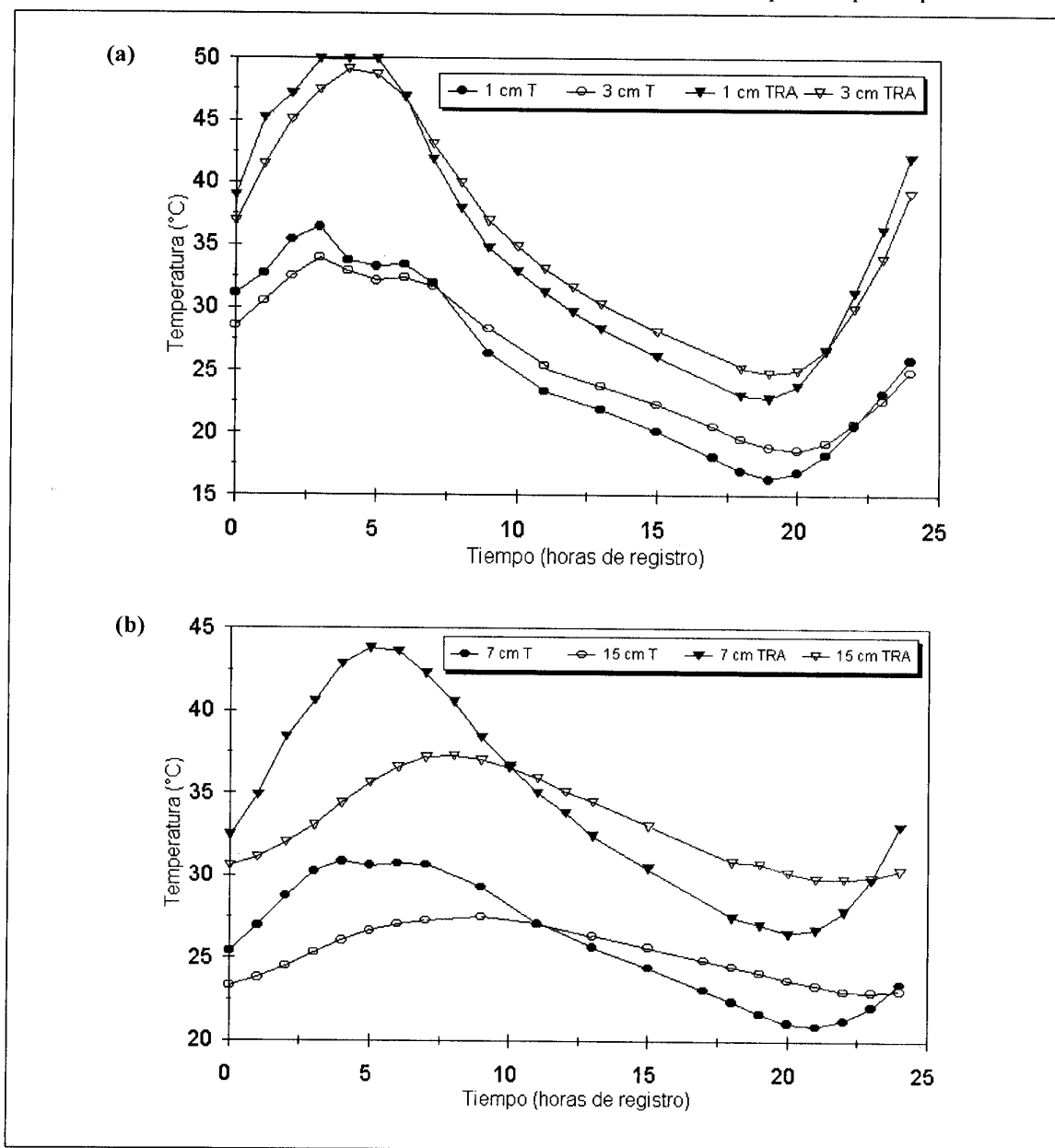


Figura 3. Evolución diaria de la temperatura del suelo bajo tratamiento polietileno (PE) transparente con relación al suelo descubierto: (a) a 1 y 3 cm de profundidad; y (b) a 7 y 15 cm de profundidad. Debido a la dificultad del gráfico, se ha construido sobre la base de la hora de registro: hora 0 = 11:00 h.

Figure 3. Daily evolution of soil temperature under transparent polyethylene (PE) treatment in comparison with uncovered soil: (a) at 1 and 3 cm depth; and (b) at 7 and 15 cm depth. Because graphing difficulties, it has been constructed with the base as the time of registry: hour 0 = 11:00 h.

rogante sobre la respuesta térmica del suelo al tratamiento de cobertura. La Figura 4 muestra los resultados obtenidos. Se hizo la prueba de hipótesis con el método de Tukey ($P \leq 0,05$), encontrando diferencias para las combinaciones 0-30, 0-38 y 10-38 cm en la temperatura máxima; las otras combinaciones de distancias desde el centro no fueron diferentes. La probabilidad calculada entre grupos fue 0,0129, con un valor de F de 5,0475. Para la temperatura mínima la prueba indicó menos diferencias entre los valores: sólo fue significativa la comparación 0-38 cm. La probabilidad calculada entre grupos fue 0,2086, con un F calculado de 1,7054. En ambos casos fueron 4 repeticiones. Se ingresó como dato el promedio de tres días de registro por repetición.

En resumen, fueron claramente diferentes las temperaturas máximas y mínimas al comparar las posiciones 0-38 cm, siendo la temperatura máxima la que expresa las mayores diferencias. Se evidencia así, la atenuación transversal de la temperatura a partir del centro.

DISCUSIÓN

El análisis de la amplitud térmica resultó un medio adecuado para evaluar estadísticamente las diferencias térmicas producidas a distintas profundidades. Aun cuando en términos físicos fuera irrelevante recurrir a este tipo de prueba, el realizarla otorga confiabilidad a los valores obtenidos en el ensayo para su utilización posterior, puesto que son indispensables para la determinación de la difusividad térmica del suelo. La amplitud térmica mostró un comportamiento casi lineal en profundidad en el caso del PE transparente, lo cual sugeriría que la profundidad estable (damping depth) se encuentra más abajo. De acuerdo con Campbell (1985), la profundidad a la cual la amplitud térmica del suelo es un 37% de la que ocurre en la superficie es aquella en que se presenta la profundidad estable; si esto es así, para el PE transparente ella sucede con una amplitud de 10,5 °C y para el suelo desnudo con una amplitud de 7 °C. Ambos valores coinciden en una profundidad de unos 12 cm, sin que esto explique el comportamiento lineal en el caso del

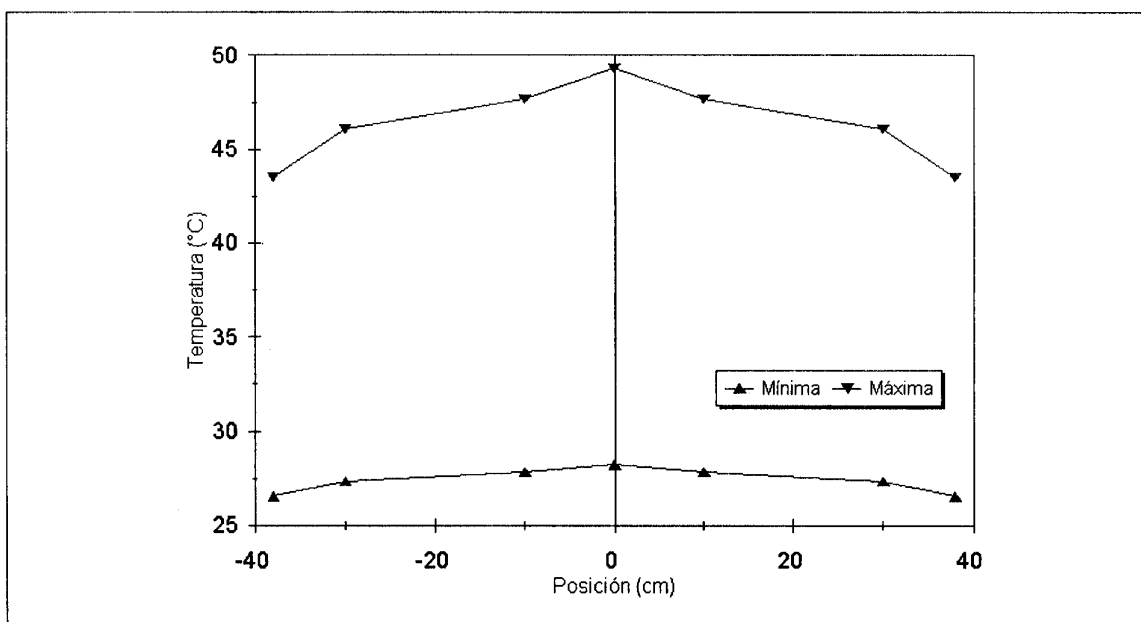


Figura 4. Efecto borde en el tratamiento con cubierta plástica de polietileno (PE) transparente al suelo. Se ha repetido la figura en forma simétrica para ilustrar su distribución espacial.

Figure 4. Border effect in the transparent plastic polyethylene (PE) treatment on the soil. Points have been repeated symmetrically for illustrate their spatial distribution.

PE transparente. Podría suponerse que la energía de evaporación que está siendo retenida por la película impermeable hace que una mayor cantidad de calor se transmita al interior del suelo, expresándose en mayor temperatura en profundidad.

Con respecto a las comparaciones entre las fases 2 y 3 debe mencionarse que aunque en rigor existe una diferencia que limitaría la posibilidad de concluir sobre ellas, el estado del clima fue favorablemente homogéneo y similar, en particular los días en que se realizó la medición del ciclo diario. Naturalmente, para obviar esta dificultad sería necesario duplicar el número de instrumentos para así realizar el ensayo en forma simultánea.

En la Fase 1 se observaron temperaturas elevadas a 7 cm de profundidad en TRA, mostrando valores probablemente excesivos durante algunas horas del día para muchas de las especies que habitualmente son cultivadas con mulch y evidenciando la posibilidad de solarizar. No obstante la mayor precisión sólo podía hacerse con los datos de las fases 2 y 3, que revelaron incrementos en la amplitud térmica de alrededor de 10 °C hasta una profundidad de 7 cm, y una temperatura media sobre 36 °C hasta esta profundidad, con temperaturas máximas posiblemente letales (> 40 °C) hasta un punto situado entre 7 y 15 cm, después de 15 días de tratamiento a partir de noviembre, y mientras se disponga de similares condiciones de radiación en la temporada.

La disminución de temperatura hacia los bordes del acolchado evidenciada en la Figura 4 muestra

un 11,8% de reducción en la temperatura máxima, y una reducción en la temperatura mínima de un 5,8%. Ello no impide que la temperatura aún disminuida en esta proporción alcance valores sobre 35 °C durante seis horas diarias hasta los 7 cm de profundidad en los bordes del acolchado. No obstante, el efecto de solarización sería localizado en la franja central, donde se hace la plantación, en una zona de 20 a 30 cm.

CONCLUSIONES

1. Se encontró que las amplitudes térmicas bajo PE TRA para cada profundidad fueron claramente diferentes, mostrando una cuantificación confiable. Ellas se incrementaron alrededor de 10 °C hasta una profundidad de 7 cm.
2. A la luz de los resultados observados en el PE transparente, es practicable la solarización en Talca (35°26' lat. Sur). Durante la Fase 3 se determinó que es posible obtener en esta latitud una temperatura media sobre 36 °C hasta 7 cm, con temperaturas máximas posiblemente letales (> 40 °C) hasta un punto situado entre 7 y 15 cm de profundidad, después de 15 días de tratamiento, en noviembre.
3. Existe una disminución de la temperatura hacia los extremos del acolchado, llamada efecto borde, que resultó significativa entre los puntos extremos, mostrando un área central con una temperatura uniforme, al menos en 20-30 cm, dato valioso en aplicaciones de solarización y cultivos anticipados.

LITERATURA CITADA

-
- Auermann, B.W., M.J. McFarland, and D.W. Hill. 1992. *In situ* determination of soil thermal characteristics. Trans. ASAE 35:833-839.
- Campbell, G.S. 1985. Soil physics with BASIC. Transport models for soil - plant systems. 150 p. Elsevier Science Publishing Company, New York, USA.
- Contreras, A., P. Acevedo, L. Pastor, y C. Eyzaguirre. 1992. Variaciones térmicas de suelo cubierto por acolchado (mulch) de polietileno. Agricultura Técnica (Chile) 52:456-461.
- Grinstein, A., G. Kritzman, A. Hetzroni, A. Gamliel, M. Mor, and J. Katan. 1995. The border effect of soil solarization. Crop Protection 14:315-320.

- Gutkowski, D., and S. Terranova. 1991. Physical aspects of soil solarization. p. 48-68. Paper 109. *In* Soil solarization. Proceedings of the First International Conference on Soil Solarization, Amman, Jordan. FAO Plant Production and Protection, Rome, Italy.
- Ham, J.M., and G.J. 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.
- Misle, E. 1998. Comportamiento térmico del suelo bajo cubiertas plásticas. 70 p. Tesis Magister Scientia. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Santiago, Chile.
- 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.
- Pullman, G.S., J.E. DeVay, and R.H. Garber. 1981. Soil solarization and thermal death: a logarithmic relationship between time and temperature for soil borne plant pathogens. *Phytopathol.* 71:959-964.
- Sellers, W.D. 1965. *Physical Climatology*. 272 p. The University of Chicago Press, Chicago, USA.