

FRANCISCO PEREA TORRES

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL MANEJO DEL SUELO EN EL RÉGIMEN TÉRMICO DE LOS VERTISUELOS DE LA VEGA DE CARMONA

Resumen. Las prácticas de Agricultura de Conservación mediante la introducción de técnicas que permiten el mantenimiento de una cubierta vegetal influyen sobre la temperatura del suelo en superficie, al aumentar el contenido de humedad en éste por reducción de la evaporación y aumento de la tasa de infiltración se pueden registrar diferencias significativas entre un suelo desnudo y un suelo cultivado con éstas técnicas. Se ha utilizado un modelo basado en la ecuación de Fourier, para describir la variación temporal de la temperatura en profundidad.

Palabras Clave. Agricultura de conservación / Temperatura del suelo.

Abstract. Reduced tillage systems accelerate heat movement in soil due to both the higher moisture content and lower pore volume at the surface layers. This behaviour is reversed in depth, as observed in the results of a field experiment. A simple Fourier based model is used to described the variation of soil temperature in depht and along the time.

Keyword. Conservation agriculture / Soil temperature.

1. INTRODUCCIÓN.

Los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el suelo están influenciados por la temperatura. La importancia de su estudio reside en el papel que juega como factor de control de la intensidad de una serie de procesos que suelen alcanzar un máximo, dentro de un cierto intervalo de temperatura (Porta 1999).

Se pueden destacar una serie de efectos derivados de la temperatura del suelo, a nivel de planta y de suelo, que suponen gran

interés en agricultura, entre los primeros la germinación de la semilla y el posterior desarrollo fenológico de la planta; en el suelo, las bajas temperaturas influyen de forma importante sobre los procesos de nitrificación y descomposición de la materia orgánica, que se ven considerablemente reducidos, y la intensidad de la biodegradación de los pesticidas en agricultura.

Las prácticas denominadas de Agricultura de Conservación, y, fundamentalmente la siembra directa, reducen la modificación de la estructura del suelo, pues las únicas operaciones son las aplicaciones de agroquímicos, la siembra y la recolección. Por ello al permitir el desarrollo de una cubierta vegetal superficial, que se mantiene durante la mayor parte del año, además de reducir la cantidad de radiación solar directa que llega al suelo, refleja mayor cantidad de radiación a la atmósfera, dado que el manto vegetal suele tener un albedo superior al del suelo desnudo, todo ello, hace disminuir las pérdidas de agua por evaporación, así como reducen el riesgo de erosión.

Un aspecto menos conocido es la evolución de la temperatura del suelo en estas condiciones. El objetivo de esta revisión es el estudio de la variación del régimen térmico del suelo bajo sistemas de agricultura de conservación

2. AGRICULTURA DE CONSERVACIÓN.

En una etapa aún temprana de la agricultura, el laboreo del suelo se debe entender como un mecanismo de control de malas hierbas y acondicionamiento del suelo para formar un buen lecho de siembra que reciba a la semilla. Con la incorporación de aperos de tracción animal, el laboreo se ve reforzado con el perfeccionamiento del arado, símbolo de la agricultura, de tal forma que se llega, en época romana, a un apero altamente cualificado, manteniendo hasta nuestros días el propio nombre de “arado romano”, además de la función original.

La introducción del tractor, en la primera mitad del siglo XX, supondría una revolución en la agricultura, aparecen aperos para cada cultivo y tipo de suelo, se alcanza un grado de especialización tan importante que conduce a consecuencias no deseadas como la aceleración de la erosión del suelo.

La necesidad de producir para una población cada vez mayor, que se estima en 10.000 millones para el año 2050, junto a los avances tecnológicos en la agricultura moderna, permiten producir un suministro de alimentos en calidad y cantidad sin precedentes, aunque sin haber aumentado excesivamente el área cultivada, ha creado en el hombre la idea equivocada de lo ilimitado de los recursos de la tierra, utilizando los campos de cultivos como si de una máquina se tratase.

Así, el constante cultivo de la tierra, asociado a las prácticas normales de agricultura tradicional, con la aplicación abusiva de los aperos, cada vez más agresivos con el medio natural, en nuestro caso el suelo, produce un efecto negativo que desemboca en la pérdida continuada de fertilidad, dada la reducción significativa de materia orgánica de éste, y por tanto, la pérdida de su estabilidad estructural, esto conduce a la formación de cortezas indeseadas para las prácticas agrícolas y, en periodos de fuertes lluvias, una pérdida considerable de suelo por erosión por escorrentía superficial.

El proceso puede resultar dramático en zonas tropicales, donde los episodios de lluvias torrenciales suelen ser frecuentes, pero en líneas generales, a mayor o menor escala, ocurre en todo el mundo.

Todo ello deriva en un aumento constante de problemas, distintos a los de la agricultura pasada, con importantes impactos medioambientales. De esta forma se pasa, a finales del siglo XX, de la euforia desbordada respecto al rendimiento de los cultivos, a la preocupación y cautela que se vive en estos momentos sobre el futuro de los recursos naturales de la tierra.

La filosofía del concepto de Agricultura de Conservación, aparece en EE.UU. durante la década de 1930-40, más por una necesidad que por otras razones, tras sufrir graves problemas de erosión de tipo eólica, que acabarían devastando los cultivos, y lo que es más importante, el suelo. La aparición del famoso libro de agricultura de Edwar Faulkner en 1943, *La locura del labrador*, donde curiosamente, después de varios milenios de agricultura, sorprende con la observación: “nunca nadie ha aportado razones científicas contrastadas para justificar el laboreo”. La aparición

del Servicio de Conservación del Suelo supone un impulso final a la formación de diversos grupos de investigación especializados en el estudio de las técnicas agronómicas de agricultura de conservación, en las Universidades americanas.

Lógicamente, en esos momentos, el mayor reto sería la lucha contra las malas hierbas en los cultivos, que constituyen el factor limitante para el desarrollo del laboreo reducido.

La aparición de herbicidas hormonales tipo 2,4-D, para el control de plantas dicotiledóneas, en 1942, y posteriormente los herbicidas de tipo bipiridilos no selectivos de acción foliar, dicuat y paracuat, en la década de 1950-60, en Gran Bretaña, desencadenarían un impulso definitivo a la investigación en este tipo de técnicas (Fernández-Quintanilla 1998).

En España las investigaciones sobre siembra directa se inician en 1980, en aquellos momentos, se establece un convenio entre la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid y el INIA, llevándose a cabo los ensayos en la Finca El Encin (Madrid). En 1982, la E.T.S. de Ingenieros Agrónomos de Córdoba, establece ensayos en la Finca Experimental de Tomejil, dependiente de la Dirección General de Investigación y Extensión Agrarias de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía, ubicada en la Vega de Carmona, obteniendo resultados esperanzadores para la introducción futura de un tipo de Agricultura, que podemos denominar sostenible, que permite compatibilizar el uso del suelo, con su actividad agrícola, y la conservación de los recursos naturales.

Procede quizás definir el concepto de Agricultura de Conservación que, según las normas de ASAE (1998), se entiende como cualquier sistema de laboreo y siembra que mantenga un mínimo del 30% de residuos vegetales de la cosecha anterior en la superficie del suelo después de la siembra, o que mantenga al menos 1.120 Kg/ha de residuos en la superficie en los periodos de erosión crítica (ASAE 1998).

Su objetivo fundamental es conservar el suelo y el agua, reducir la erosión, al mismo tiempo que se permite una disminución considerable de los costes de producción de los cultivos.

De esta primera aproximación a las técnicas de laboreo de conservación se desprende la filosofía fundamental de la siembra directa, es decir, la necesidad imperiosa de obtener una cubierta vegetal que permita poner de manifiesto la bondad del sistema, facilitando de esta forma la optimización de los parámetros agronómicos derivados del uso de estas prácticas.

Entre los sistemas de Agricultura de Conservación, procede destacar:

Laboreo mínimo, en el que se simplifican las operaciones de laboreo al máximo, la vertedera es sustituida por arados de alzada vertical menos profunda, tipo chisel, la profundidad de trabajo no supera los 20 cm, dejando una cubierta vegetal entre 25 y 30%, formada por los residuos de la cosecha anterior, en este caso la cubierta se mantiene limpia mediante la aplicación de herbicidas de contacto y de acción foliar.

Siembra en caballones, interesante para suelos donde existen problemas de asfixia radicular, y consiste en formar caballones para sembrar en la cresta de éstos, quedando en fondo cubierto con residuos vegetales.

Laboreo en franjas, indicado para cultivos en líneas, donde, únicamente, se labra una pequeña porción de suelo, donde van colocadas las semillas.

Laboreo nulo o siembra directa, en el cual una vez cosechado, no se realiza ninguna operación con tractor, excepto las operaciones de siembra y aplicaciones con los herbicidas necesarios para mantener la cubierta limpia, a la hora de realizarla.

La única labor realizada es la de los discos abridores de la sembradora y los demás elementos propios de ésta. El suelo en este sistema queda cubierto en superficie al menos por 80% de residuos.

3. MECANISMO DE TRANSMISIÓN DE CALOR EN EL SUELO.

Existe una estrecha relación entre la temperatura del suelo y la del aire en contacto con éste. El contenido de calor en el suelo es



▲
Laboreo mínimo.

▼
Siembra directa.



función de las características y estado del sistema, flujo radiante que recibe, propiedades térmicas que posee y contenido de agua en sus distintos puntos.

Es necesario conocer los sistemas de transmisión de calor en el suelo antes de abordar el estudio de la temperatura en éste, en general, se considera que el calor puede ser transmitido de un compartimento a otro mediante diversos procesos, entre los que cabe destacar:

- a) Conducción, que se debe al paso de las partículas sólidas del suelo, al absorber calor pasan a un estado de energía cinética mayor, derivando en un aumento de la agitación térmica, y, por tanto, transfieren dicha energía cinética al chocar unas con otras. Es un mecanismo de gran importancia en suelos secos.
- b) Convección, donde el calor se transmite por el movimiento de un fluido, en este caso el agua, debido a la existencia en los distintos compartimentos del suelo de gradientes diferenciales de temperatura, tiene importancia en suelos húmedos.
- c) Radiación, debida a las ondas electromagnéticas emitidas por un cuerpo cuya temperatura es mayor de 0°K . Éste es el principal proceso de intercambio de energía entre el suelo y la atmósfera.
- d) Evaporación y condensación de agua, que supone un proceso de transferencia de calor latente.

Las propiedades térmicas del suelo, están descritas por dos parámetros fundamentales:

- a) Capacidad calorífica o capacidad del suelo para almacenar calor por unidad de volumen o de masa y unidad de temperatura, y puede describirse como la cantidad de calor necesario para que la unidad de volumen del suelo aumente un grado su temperatura en condiciones isobáricas.
- b) Conductividad térmica o cantidad de calor transferida por conducción en la unidad de tiempo.

4. MATERIAL Y MÉTODOS.

Para estudiar la evolución de la temperatura en suelos sometidos a condiciones diferenciales de manejo, se ha utilizado el ensayo establecido en la Finca Experimental de Tomejil. Dicho ensayo es pionero en este tipo de prácticas agrícolas, donde se ha estudiado el comportamiento agronómico en cultivos herbáceos de secano con una alternativa de trigo, girasol y leguminosas (Giráldez y col. 1985).

Es necesario, por tanto, hacer una descripción de los suelos y la climatología de la zona estudiada.

La finca Tomejil se encuentra en una zona muy representativa de la provincia de Sevilla, localizada en plena Vega de Carmona, y ocupada por suelos que representan una superficie considerable de la campiña andaluza, constituyen las tierras típicas del cultivo de secano en nuestra región. Concretamente, en la zona estudiada se ha calculado que puede haber aproximadamente unas 78.000 ha de vertisoles o bujeos, que así se les denominan en la región, entre las localidades de Carmona, Fuentes de Andalucía, Marchena y El Arahál.

Las coordenadas de esta finca corresponden a 37° 24' 07" N de latitud y 05° 35' 10" W de longitud, y a 79 msnm.

La Vega de Carmona (Sevilla) es una depresión situada al este de Los Alcores, y ocupada por terrenos del mioceno, sobre los que se han desarrollado los suelos arcillosos conocidos como tierras negras o bujeos, pertenecen al orden vertisol, de marcado carácter xérico, de aquí su pertenencia al suborden xererts, dado que se abren y cierran grietas una vez cada año, permaneciendo abiertas durante 60 o más días (SCS 1975, cap. 17).

Son suelos con un elevado contenido en arcillas, superior al 60%, la mayor parte de la cual es expansible, lo que provoca movimientos en el interior del perfil, dando lugar a una homogeneidad en toda la profundidad. La mayor parte de la fracción arcilla, 70% aproximadamente, pertenece al tipo montmorillonita, que le confiere dicho carácter expansible al suelo, consideradas de la mejor calidad agrícola. El resto es illita (20%) y caolinita acompañada de clorita (10%) (González, P. 1999).

▼
Finca experimental de
Tomejil.

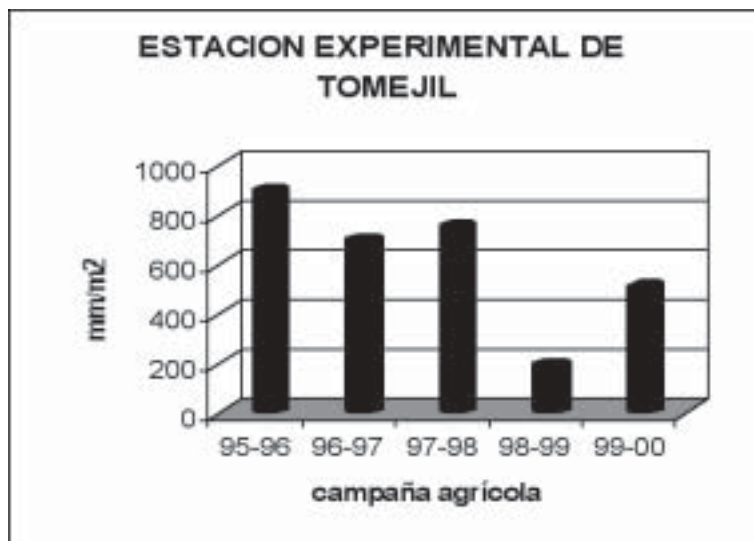


Por su porosidad elevada y su lento drenaje retienen el agua durante la estación seca, lo que permite el cultivo de primavera, aunque el tamaño reducido de sus poros y la ausencia de esqueleto rígido, cuando húmedo, reducen la velocidad de infiltración y aceleran la de evaporación (Giráldez y col. 1978).

Desde el punto de vista climatológico, esta zona presenta dos características que la definen: larga sequía estival y fuerte irregularidad interanual e intraanual en los totales pluviométricos, que unido a las altas temperaturas registradas durante el verano, provocan un carácter negativo a la actividad agrícola.

Las precipitaciones constituyen el factor esencial que más limita la producción de este tipo de agricultura de secano, de tal forma que la zona se caracteriza por tener poca diversidad de cultivos, destacando fundamentalmente los cereales, sobre todo, trigo, oleaginosas como el girasol y algo de leguminosas, garbanzos y habas, aunque en pequeñas proporciones.

La media histórica se puede establecer en 480 mm, precipitaciones que serían suficientes para este tipo de cultivos herbáceos si estuviesen distribuidas de forma uniforme, desgraciadamente las precipitaciones ocurren con grandes diferencias interanuales como se puede observar en el gráfico, realizado durante la cam-



pañas agrícolas 95-96 a 99-00, diferencias que pueden ir desde 900 litros/m² en la campaña agrícola 95/96 a 189 litros/m² en la campaña 98/99, constituyendo éste uno de los años más secos del pasado siglo XX.

Las temperaturas medias máximas y mínimas se caracterizan por alcanzar valores elevados estivales, alrededor de los 35,5 °C y máximas absolutas de 45° durante los meses de Julio y agosto, en contraste con las temperaturas invernales con medias de 4 a 5 °C, observándose pocas temperaturas por debajo de cero grados centígrados.

La media anual está en torno a los 19 °C, lo que indica que nos encontramos en una zona caracterizada por tener un clima mediterráneo-continental con veranos tórridos, factor que limita en gran manera los cultivos de verano, e inviernos frescos, que favorecen incluso el cultivo de cereales de invierno.

El diseño experimental del ensayo es de bloques al azar con parcela elemental de 180x15 m² con tres tratamientos y cuatro repeticiones.

Los tratamientos utilizados son, desde el año 1982, una alternativa de trigo-girasol-leguminosa en tres sistemas de manejo del suelo, laboreo convencional (LT), en el cual las labores realizadas tratan de imitar las efectuadas de forma tradicional por los agricultores de la zona, es decir, quema de rastrojos y alzado con aperos de tipo vertedera que invierten los horizontes del suelo a una profundidad de 50 cm, aproximadamente, posteriormente se efectúan sucesivas labores más superficiales, que permiten preparar el lecho de siembra. Laboreo mínimo (LM), en el cual, las labores profundas de vertedera son substituidas por labores de tipo vertical, más superficiales y menos agresivas con el suelo, tipo arado cincel o subsolador. Por último, se ha introducido un tercer tratamiento denominado de siembra directa (LN), en el cual las labores han sido reducidas por completo, dejando el suelo protegido la mayor parte del año por una cubierta vegetal procedente de los residuos de la cosecha del año anterior, el control de malas hierbas se realiza mediante la aplicación de herbicidas totales, de bajo impacto medioambiental, y lógicamente el uso de la maquinaria estará relegado a la aplicación de éstos fitosanitarios, la siembra,

que se debe realizar con máquina especializada para estos sistemas, y la recolección.

| | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| LM | LT | LN | LT | LT | LN | LM | LM | LT | LN | LN | LM |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|

Para la toma de datos de temperatura del suelo, se han utilizado pequeños termistores, como los que se observan en la foto, conectados a registradores de datos que permiten acumular la información, y posteriormente, el análisis de éstos con soporte informático en entorno windows. Los termistores se pueden programar con anterioridad a su colocación en el suelo, de tal forma que podemos ajustar el intervalo de tiempo con el cual se quiere obtener datos de este parámetro físico que se pretende estudiar. (Perea, F 1998)

Los sensores de temperatura se colocaron durante un periodo de tiempo determinado en las parcelas de laboreo convencional y siembra directa, a dos profundidades distintas, superficial y a quince centímetros.

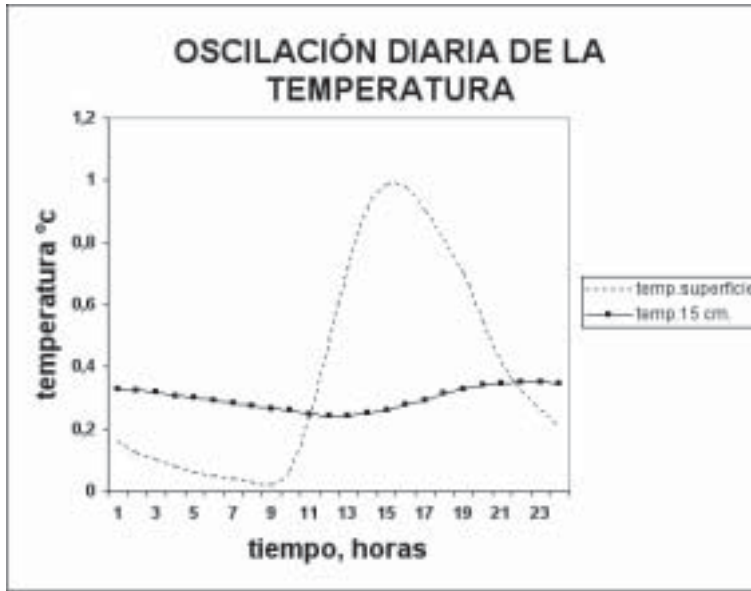
5. RESULTADOS.

La variación temporal de la temperatura está condicionada por la variación periódica de la radiación solar recibida en superficie. Durante el día la temperatura varía principalmente debido al movimiento aparente del sol sobre el horizonte. La radiación neta absorbida por la superficie terrestre se transmite fundamentalmente por conducción hacia las capas más profundas del suelo aumentando en su trayectoria la temperatura de las mismas. En general es más elevada en horas del día y más baja durante la noche. El valor que toma la temperatura hora a hora, representado en un sistema de coordenadas ortogonales, se denomina, marcha diaria de la temperatura. La fluctuación suele ser muy regular asemejándose a una senoide.

▲ Diseño experimental del ensayo de agricultura de conservación. Tomejil (1982-2003).

▼ Sensor de temperatura del suelo.





El gráfico ilustra la marcha diaria de la temperatura, se observa, en primer lugar, cómo efectivamente hay una oscilación importante en superficie relacionada con la absorción de la radiación solar por el suelo, en segundo lugar, destacar una tendencia hacia la amortiguación de dicha oscilación de la temperatura en relación a la profundidad del suelo, de tal forma que prácticamente a 15 cm no hay influencia de la oscilación diaria de la radiación solar, cuestión ésta interesante, por ser una zona de influencia importante para el desarrollo del sistema radicular de las plantas cultivadas.

Cuando comparamos los resultados obtenidos de las temperaturas medias normalizadas en ambos tratamientos de suelo, es decir, laboreo convencional y siembra directa, se observan diferencias significativas de uno a otro

Los siguientes esquemas ilustran de forma gráfica el comportamiento térmico en suelos que no han sido labrados desde hace bastante tiempo, estudiados en dos periodos, Diciembre-Enero 1999-2000, primer gráfico siguiente, y Febrero-Marzo de 2000, segundo gráfico.

Se comprueba en primer lugar, la existencia de una curva sinusoidal en la superficie del suelo, que como ya ha sido dicho, está relacionada con la radiación solar neta que llega al suelo:

$$R_n = (1-\alpha) R_{oc} + R_{lod} - R_{ola}$$

Ésta depende de:

α = Coeficiente de albedo o de reflexión, el cual está relacionado con factores como la rugosidad del suelo, tipo de cultivo, etc.

R_{oc} = Radiación de onda corta que proviene de la energía solar.

R_{old} = Radiación de onda larga descendente que proviene del propio suelo.

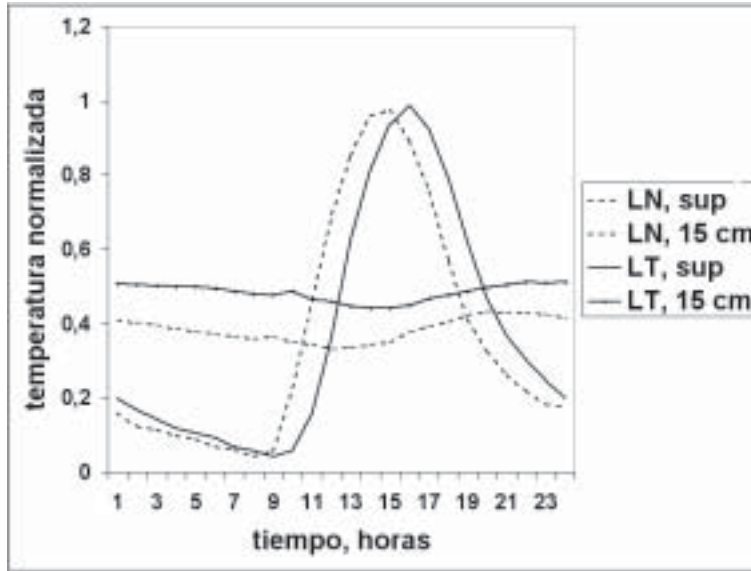
R_{ola} = Componente de radiación de onda larga ascendente, de carácter negativo para el valor total de la radiación neta que calienta el suelo.

La energía aportada por la radiación solar se distribuye por la capa de residuos y, posteriormente, por el suelo, transportándose, además de por radiación, por conducción, a través de moléculas de un mismo cuerpo en contacto entre ellas, y por convección, debido a la presencia de algún fluido.

Cabe esperar entonces, que todo aquello que modifique las características estructurales de los suelos, en este caso las labores efectuadas en los sistemas de laboreo de conservación, modificará el comportamiento térmico de éstos.

La figura ilustra este efecto, los suelos que han sido labrados de forma tradicional, presentan una curva sinusoidal normal en superficie, aunque presenta un retraso horario con respecto a los suelos sometidos a la práctica de siembra directa. Este efecto encuentra una respuesta clara si se tiene en cuenta el menor volumen de poros en superficie en los últimos al mismo tiempo que un mayor contenido de humedad en ese horizonte.

La conductividad térmica del agua ($0,25 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) es mayor que la del aire ($0,025 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$), por tanto, cuanto mayor contenido en agua, mayor conductividad térmica, y el suelo se calentará con mayor rapidez, como ocurre con la curva generada en superficie

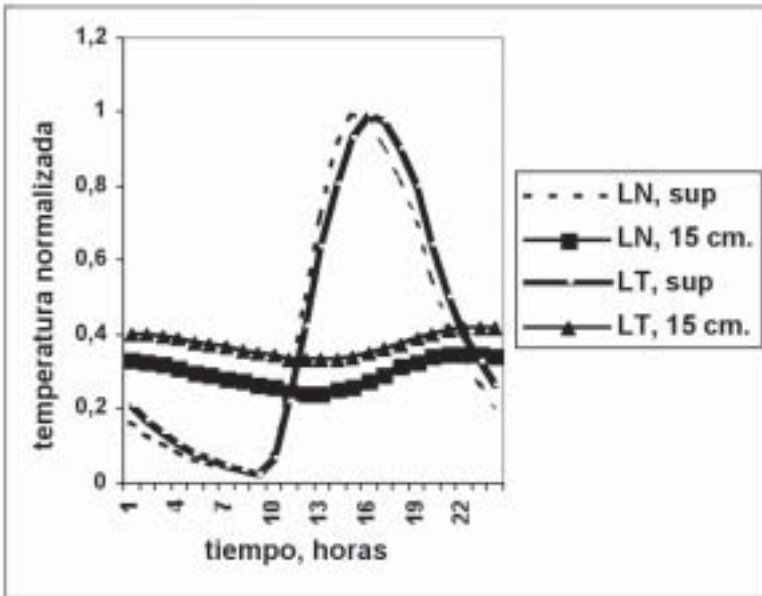


en el suelo LN frente a LT. Sin embargo, el pico en LT es mayor que en LN, dado que la capacidad calorífica del agua es bastante mayor que la del aire, requiriendo más cantidad de calor el agua que el aire para elevar un grado su temperatura.

No ocurre lo mismo cuando se estudia la evolución de la temperatura en profundidad, aunque sigue la tendencia a la amortiguación del efecto diario de la radiación solar neta incidente sobre el suelo, se observa claramente como los sistemas de laboreo tradicional presentan mayor temperatura en ese horizonte, efecto que aunque parece contradictorio con los resultados obtenidos en superficie, encuentran explicación al considerar impulsos a distinta escala, ya que en superficie la oscilación se debe a la marcha diaria de la temperatura, mientras que en profundidad interviene el ciclo anual de enfriamiento. Dado que los suelos LT suelen tener menor contenido en agua que los tratamientos LN, el enfriamiento anual será menor en los primeros que en los segundos, por presentar menor conductividad térmica.

El efecto de la evolución de la temperatura presenta el mismo cuadro cuando se estudia otro periodo de tiempo.

Como primera conclusión de este estudio, cabe destacar que los suelos sometidos a siembra directa, aunque se calientan con



más rapidez en superficie, suelen ser suelos más fríos en las capas más profundas de influencia radicular. La reducción de las labores permite el desarrollo de un suelo bien estructurado, que lógicamente ve reducido el volumen de aire, que es desplazado por el agua.

6. APLICACIÓN DEL MODELO DE GUPTA.

Como consecuencia de todo lo anteriormente dicho, la temperatura del suelo puede ser descrita mediante un análisis armónico (Bloomfield 1976). La transmisión de calor puede ser estudiada por la ecuación diferencial del flujo de calor o segunda ley de Fourier, una ecuación en derivadas parciales que representa la temperatura T , en función de la profundidad Z , y el tiempo t , con ayuda de un parámetro K , cociente entre la conductividad térmica y la capacidad calorífica del suelo, conocido como difusividad térmica:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}$$

La difusividad térmica expresa la inercia térmica del suelo, medida como la variación de temperatura debido al flujo de calor.

El suelo, al ser un sistema dinámico de tres fases organizado en horizontes, transfiere calor de una forma bastante compleja, por lo que esta ecuación parte de una serie de hipótesis restrictivas:

- 1) Se considera que el flujo de calor es solo por conducción, despreciando los valores de convección, cuestión a tener en cuenta en condiciones de campo con suelos húmedos.
- 2) El volumen de suelo considerado es isótropo y homogéneo.
- 3) Los parámetros físicos del sistema son constantes.
- 4) No hay transferencias de componentes.
- 5) Las variaciones de volumen debidas a los cambios de temperatura son despreciables.
- 6) No hay radiación de calor.
- 7) No se genera calor dentro del volumen considerado.

El modelo de Gupta utiliza las temperaturas máximas y mínimas del aire para predecir las temperaturas del suelo con distinto grado de cobertura, debido al manejo de éste, así como el flujo de calor (Gupta y col. 1981).

Para la aplicación de este modelo se tomaron temperaturas horarias del suelo a dos profundidades, 0.05 y 0.15 m, en los tratamientos del suelo de Laboreo convencional y No laboreo.

El primer paso es normalizar las temperaturas, obtenidas mediante los termistores, con respecto a las temperaturas máximas y mínimas obtenidas en la superficie del suelo, para ello se utilizó la siguiente ecuación (1):

$$\Gamma_{z,t} = \frac{T_{z,t} - T_{o,sn}}{T_{o,sx} - T_{o,sn}}$$

Donde:

$\Gamma_{z,t}$ = Temperatura normalizada del suelo en la profundidad z y el tiempo t.

$T_{z,t}$ = Temperatura de suelo en °C en la profundidad z y el tiempo t .

$T_{o,sn}$ = Temperatura mínima del suelo en superficie en °C.

$T_{o,sx}$ = Temperatura máxima del suelo en superficie en °C.

La temperatura del suelo normalizada media, para un periodo de días estudiado, con respecto a la profundidad z y el tiempo t , se calcula a partir de la ecuación (2):

$$\Gamma_{z,t}^{*} = 1/N \sum \Gamma_{z,t}$$

La integración de la ecuación (1), sometida a la condición inicial, el perfil térmico de partida, y a las condiciones de contorno, variación de la radiación, o subsidiariamente, la temperatura en superficie, y en una profundidad que limita el dominio de la ecuación, da como resultado una dependencia sinusoidal de la temperatura con el tiempo. Como ésta dependencia no es muy clara en ocasiones, es preferible efectuar un análisis armónico de la temperatura

El estudio del comportamiento térmico del suelo, se puede determinar realizando un análisis del movimiento armónico simple que está representado por las series de Fourier donde la frecuencia, número de oscilaciones en un segundo, es dependiente de la velocidad angular en este tipo de movimiento (Van Wijk 1963; Allmaras et al. 1977).

Se describe de esta forma la ecuación (3):

$$T_{o,t} = \bar{T} + \sum_{k=1}^{\infty} (\alpha_k \cos k\omega t + \beta_k \sin k\omega t)$$

$T_{o,t}$ = Temperatura horaria de la superficie del suelo en el tiempo t .

\bar{T} = Temperatura media normalizada.

k = Indicador de armónicos en las series de Fourier.

$$\alpha_k = A_{o,k} \sin \phi_{o,k}$$

$$\beta_k = A_{o,k} \cos \phi_{o,k}$$

$\varpi =$ Frecuencia ($2\pi/n$), siendo n , el número de observaciones periódicas en un día, $n=24$ para registros horarios, y $n=48$ para registros semi-horarios.

La ecuación (3) se puede escribir también como ecuación (4):

$$T_{o,t} = \bar{T} + \sum_{k=1}^{\infty} A_{o,k} \sin(k\varpi t + \phi_{o,k})$$

Donde :

$A_{o,k} =$ Amplitud de los K armónicos de las series de Fourier que describen la temperatura real del suelo en superficie en °C, viene definida por el valor máximo de la altura de la sinusoidal que representa la variación de la temperatura con respecto al tiempo.

$\phi_{o,k} =$ Angulo de fase de los K armónicos de las series de Fourier que describen la temperatura real del suelo en superficie en °C.

Las series de Fourier se pueden utilizar, de esta forma, para calcular la variación de la temperatura con cada profundidad, mediante la ecuación (5):

$$T_{z,t} = \bar{T} + \sum_{k=1}^{\infty} A_{o,k} \exp(-zk^{1/2}/D_1) \times \sin(k\varpi t + \phi_{o,k} - zk^{1/2}/D_1)$$

Donde, ecuación (6):

$$D_1 = (2K/\varpi)^{1/2}$$

Ecuación que asume que la difusividad térmica del suelo es constante con respecto a la profundidad y el tiempo, y que las temperaturas en todas la profundidades oscilan alrededor de unos valores medios de temperatura.

Para identificar los parámetros de la ecuación (3) se utilizan las propiedades de las funciones sinusoidales:

$$\bar{T} = 1/n \sum T_{nzt}$$

T_{nzt} = Temperatura normalizada a la profundidad z y el tiempo t .

$$\alpha_k = 2/n \sum T_{nzt} \cos k\omega t$$

$$\beta_k = 2/n \sum T_{nzt} \sin k\omega t$$

La temperatura media normalizada del suelo se puede expresar mediante una función periódica equivalente a la de la ecuación (5) como ecuación (7):

$$\Gamma_{z,t}^* = \bar{\Gamma}^* \sum_{k=1}^{\infty} A_{o,k}^* \exp(-zk^{1/2}/D_1) \times \sin(k\omega t + \phi_{o,k}^* - zk^{1/2}/D_1)$$

En esta ecuación, la amplitud ($A_{o,k}^*$) y el ángulo de fase ($\phi_{o,k}^*$) de varios armónicos a diferentes profundidades están relacionados con los valores de superficie mediante las ecuaciones:

$$A_{z,k}^* = A_{o,k}^* \exp(-z/D_k)$$

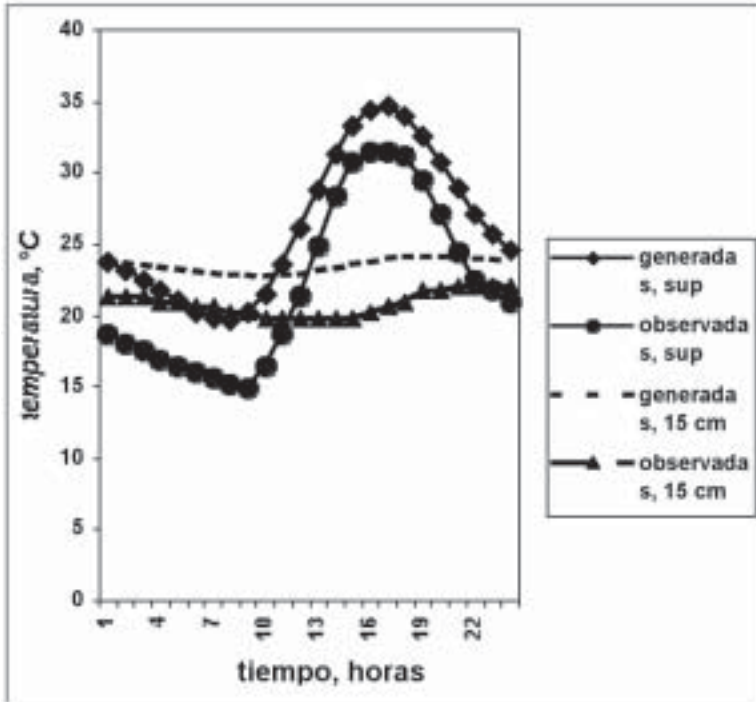
$$\phi_{z,k}^* = \phi_{o,k}^* - z/D_k$$

$$D_k = D_1/k^{1/2}$$

$$D_k = D_1/k^{1/2}$$

Donde D_k es la profundidad de amortiguamiento para k armónico.

Una vez descrito el modelo de Gupta, que como ya se ha dicho, requiere las temperaturas máximas y mínimas del aire, y su relación con la máximas y mínimas de la superficie del suelo, la difusividad térmica del suelo y los coeficientes de Fourier para la temperatura media normalizada del suelo, se puede observar el gráfico resultante de su aplicación, en este caso, para una parcela sometida a siembra directa en el ensayo establecido en la Finca Tomejil, durante el día 27 de Septiembre de 1999.



Se observa como la trayectoria de las temperaturas generadas por el modelo en superficie, es mayor que las temperaturas observadas, del orden de varios grados superior en la primeras.

El mismo efecto ocurre cuando estudiamos las temperaturas en la profundidad de 15 cm.

Esta desviación en los datos generados por el modelo Gupta puede deberse a que dicho modelo sólo tiene en cuenta el flujo de calor por conducción, sin embargo, en la realidad, el suelo tiene un cierto contenido de humedad, de tal forma que en la ecuación de flujo de calor habría que tener en cuenta la ecuación asociada de convección.

Puede ocurrir también que las grietas que estos suelos vérticos generan, interfieran en la desviación de los datos observados de la temperatura del suelo, de aquí la dificultad de cuantificar de forma fiable la evolución de este parámetro.

De cualquier forma, y a modo de conclusión, decir que, efectivamente, aunque el modelo de Gupta no se adapta perfectamente

a nuestras condiciones, físicas y edáficas, sí puede servir para tener una buena aproximación para estimar las temperaturas del suelo a partir de las temperaturas del aire.

BIBLIOGRAFÍA.

ALLMARAS, R.R., E.A. HALLAUER, W.W. NELSON, and S.D. EVANS. 1977. Surface energy balance and soil thermal property modifications by tillage-induced soil structure. Univ. of Minnesota. *Agric. Ext. St. Techn. Bull.* N° 306. St. Paul, Minn.

BLOOMFIELD P. 1976. *Fourier analysis of time series: An introduction*. J. Wiley. New York.

FAULKNER E. 1943. *Plowmans Folly*.

FERNÁNDEZ-QUINTANILLA C. 1998. Historia y evolución de los sistemas de laboreo. El laboreo de conservación. *En Agricultura de conservación, fundamentos agronómicos, medioambientales y económicos*. Pp. 3-10.

GIRÁLDEZ, J.V. y SPOSITO. 1978. *Water Resour. Res.*, 14, 314-318.

GIRÁLDEZ, J.V., FERERES, E., GARCÍA, M., GIL, J., GONZÁLEZ, P. y AGÜERA, J. 1985. Laboreo mínimo y siembra directa en los suelos arcillosos de la campiña andaluza. *II Jornadas Técnicas sobre cereales de invierno*, Pamplona pp. 77-94.

GONZÁLEZ, P. y GIRÁLDEZ, J.V. 1999. *Comunicación personal*.

GUPTA, S.C., LARSON, W.E. and ALLMARAS R.R. 1984. Predicting soil temperature and soil heat flux under different tillage-surface residue conditions. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 48 pp. 223-232.

GUPTA, S.C., LARSON, W.E. and LINDEN D.R. 1983. Tillage and surface residues effects on soil upper boundary temperature. *Soil Science Society of America Journal*. J. 47 pp. 1212-1218.

GUPTA, S.C., RADKE J.K. and LARSON W.E. 1981. Predicting temperatures of bare and residue covered soil with and without a corn crop. *Soil Science Society of America Journal* . Vol 45: 405-412.

PEREA F. 1998. *Tesis Doctoral*. Córdoba.

PORTA. 1999. *Tratado de edafología agrícola*.

SOIL CONSERVATION SERVICE. 1975. *Soil Taxonomy*, USDA Agr. Hbk., n° 436. Washington.

STANDARD ASAE S477. Dec. 98. Terminology for soil-enganging component for conservation. Tillage planter, Drills and Seedrs, St, Joseph.

VAN WIJK, W.R. 1963. *Physics of plant environment*. North Holland, Amsterdam.