PARAMETROS AMBIENTALES QUE AFECTAN LA TEMPERATURA DEL SUELO EN TURRIALBA, COSTA RICA Y SUS CONSECUENCIAS PARA LA PRODUCCION DE CULTIVOS¹

Warren Forsythe*

Palabras clave: Radiación bimodal, Ecuador climático, advección.

RESUMEN

En Turrialba, Costa Rica, la radiación solar (R_c) durante el año es bimodal e influye sobre la media de temperatura del ambiente y del suelo. Dicha variación está influenciada por las fechas de 16 de abril y 26 de agosto que corresponden a las épocas cuando los rayos del sol de medio día caen perpendicularmente a la superficie del orbe y proporcionan la intensidad máxima. En cambio, el día más largo del año, el 21 de junio, tiene muy poco efecto sobre la temperatura del ambiente y del suelo ya que a esta latitud (9.88°N) la variación del largo de día es muy poca. Los picos bimodales pueden verse suprimidos o desplazados por la ocurrencia de lluvias y la nubosidad. Los picos de radiación promedio mensual están seguidos por picos de temperatura promedio ambiental mensual un mes después, los cuales son la culminación de épocas de calentamiento acumulativo debido a que la energía recibida de la radiación diurna sigue en exceso de aquella perdida durante el enfriamiento nocturno hasta llegar a tal culminación. Después de la culminación sigue una época de enfriamiento acumulativo. Los picos de temperatura ambiental mensual coinciden con los picos de temperatura mensual del suelo hasta 30 cm de profundidad. A una profundidad mayor de 10 cm las medias anuales de la temperatura del suelo varían muy poco con la profundidad siguiendo el modelo

ABSTRACT

Environmental parameters that affect the soil temperature in Turrialba, Costa Rica and their consequences for crop production. In Turrialba, Costa Rica solar radiation (R_c) is bimodal during the year and it influences the mean ambient and soil temperatures. This variation is influenced by the dates 16 of April and 26 of August which correspond to periods when the solar rays at midday are perpendicular to the earth's surface and provide maximum intensity at this latitude (9.88°N). On the other hand, the 21st of June, the longest day of the year, has very little effect because the variation of day length is very small. The same tendency is observed in the rest of Costa Rica. The bimodal peaks can be suppressed or displaced by rain and cloudiness. The peaks of average monthly radiation are followed one month later by peaks of average monthly ambient temperature, which are culminations of periods of accumulative heating due to energy received during diurnal radiation being greater than that lost during nocturnal cooling, until such culmination is reached. After the culmination, a period of accumulative cooling follows. The peaks of monthly ambient temperature coincide with the peaks of monthly soil temperature up to 30 cm depth. At depths greater than 10 cm, the mean annual soil temperature varies very little with depth thus following the

^{1/} Recibido para publicación el 27 agosto del 2001.

Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

explicado por Montieth y la Taxonomía de Suelos. En cambio entre 0-10 cm, las medias anuales se encuentran en una posición central con respecto a las medias mensuales y muestran una tendencia de aumento hacia la superficie. La temperatura a 10 cm muestra un valor mínimo, sugiriendo una salida de calor a esta profundidad, donde una lluvia fuerte caída en la noche y su nubosidad acompañante al día siguiente, que enfriaron el suelo hasta 20 cm de profundidad. Posteriormente la trama 0-10 cm se recalentó, dando como resultado una tendencia de un mínimo a 10 cm de profundidad apreciable en los valores mensuales. Esto demuestra un enfriamiento en el subsuelo por una advección de agua fría causada por la penetración del agua de lluvias. La temperatura promedio anual del suelo a 50 cm de profundidad (T₅₀) en Turrialba es el 25,4°C y la fluctuación del promedio mensual es de 1,9°C; de esta manera, el régimen temperatura del suelo según el sistema taxonómico de suelos de los Estados Unidos es isohipertérmico. El promedio de temperatura anual del suelo a 50 cm (T₅₀) menos el promedio de temperatura anual ambiental (T_a) es de 3,80°C. En otras partes de Costa Rica esta diferencia varía entre 2,2°C y 3,9°C, valores similares a los encontrados en Venezuela (2-12°N). En cambio para la mayoría de los Estados Unidos, el valor es de 1°C. Las plantas en el campo crecen bajo temperaturas fluctuantes ambientales y no en temperaturas constantes tal como ocurre en experimentos controlados. Las observaciones de Trojer en Colombia sobre temperaturas críticas para cultivos en la zona tropical, permiten identificar un ecuador climático a 5°N (región donde hay un desplazamiento de la estación seca de 6 meses). Estas observaciones sobre el ecuador climático, indican que al desplazarse entre 8°N y 4°N, el año con la estación seca de eneromarzo se cambia a uno con 2 estaciones secas en enero-marzo y agosto-octubre y luego a 1 año con una estación seca en agosto-octubre. Esta faja tiene muy poca variación de la temperatura media mensual ambiental. Datos de Forsythe confirman las mismas tendencias en las planicies costeras de Guyana.

model explained by Montieth and Soil Taxonomy. On the other hand, between 0 and 10 cm, the annual means are found in a central position with respect to the monthly means and they show a tendency to increase towards the surface. The temperature at 10 cm shows a mininum value suggesting a heat sink at that depth. This is explained by a heavy rain during the night and its accompaning cloudiness the following day, which cooled the soil to 20 cm depth, and subsequently the 0-10 cm section was reheated and this resulted in a tendency for a minimum at 10 depth seen in the monthly values. This demonstrates a cooling in the subsoil by the addvection of cold water by the penetration of rain water. The average annual soil temperature at 50 cm depth (T₅₀) in Turrialba is 25.4°C and the fluctuation of the monthly average is 1.9°C, and as a result, the temperature regime of the soil taxonomy system of the U.S.A. is isohyperthermic. The annual average at 50 cm depth (T₅₀) less the annual ambient average, T_a, is 3.80°C. Values for other parts of Costa Rica vary between 2.2°C and 3.9°C and they are similar to values found in Venezuela (2-12°N). On the other hand, the value is 1°C for the majority of the U.S.A. Plants in the field grow under fluctuating ambient temperatures and not in constant temperatures as occur in controlled experiments. The observations of Trojer in Colombia have made an important contribution about the critical temperatures for crops in the tropical zone, the identification of the climatic equator at 5°N (where there is a displacement of the dry season by 6 months). The observations of Trojer about a transition zone of what he calls the climatic equator in Colombia indicate that in going between 8°N and 4°N, the year with a dry season in January-March changes to one with 2 dry seasons in January-March and August-October and then to one with a dry season in August-October. This belt has very little variation of the mean monthly ambient temperature. Data obtained by Forsythe confirm the same tendencies in the coastal planes of Guyana.

INTRODUCCION

La temperatura del suelo afecta la selección de la fecha de siembra, el crecimiento de las plantas y los microorganismos y las propiedades del suelo a través de su grado de meteorización. En las zonas tropicales, las fluctuaciones estacionales de la temperatura del aire y del suelo son menores que en la zona templada y las fluctuaciones diarias son de mayor magnitud que las estacionales. En el suelo, la penetración de las fluctuaciones diarias de temperatura alcanza hasta 20 a 30 cm de profundidad, las fluctuaciones mensuales hasta 2 m y las anuales hasta 10 m de profundidad (Trojer 1966a, Allen et al. 2000). El control de la temperatura del suelo puede darse seleccionando la zona ecológica, el manejo de la sombra, el tipo de cobertura, la profundidad de siembra, el riego y el drenaje.

Para definir los regímenes de temperatura del suelo, se mide esta variable a 50 cm de profundidad, ya que está fuera del alcance de las fluctuaciones diarias. A esta profundidad en las zonas tropicales, la diferencia de temperatura media del mes más caliente y la del mes más frío es de 5°C o menos y, según el piso altitudinal, puede considerarse isohipertérmica (temperatura media anual a 50 cm de profundidad mayor a 22°C), isotérmica (15-22°C), isomésica (8-15°C) o isofrígida (< 8°C) (Soil Survey Staff 1999).

La radiación solar que calienta la superficie del orbe es de onda corta y mayormente visible. Dicha radiación viene del espacio y antes de entrar a la atmósfera se llama la radiación extraterrestre (R_a). Cuando esta radiación penetra la atmósfera, parte de la misma es difundida, reflejada o absorbida por los gases atmosféricos, las nubes y el polvo; a la radiación resultante que llega a la superficie de la tierra se le llama radiación solar (R_c) o radiación de onda corta. Parte de la radiación extraterrestre reflejada vuelve al espacio, mientras que la radiación absorbida calienta la atmósfera y produce radiación infrarroja o radiación de onda larga (R₁). Cuando la R_s toca la superficie de la tierra, una fracción de la misma, conocida como albedo (a), es reflejada, por lo que queda la radiación solar neta en la superficie (R_{ns}). Una parte de la R_{ns} calienta la superficie del orbe y produce radiación de onda larga que va hacia arriba ($R_{L,arriba}$). Una parte de la $R_{L,arriba}$ se escapa al espacio y la otra parte junto con otra radiación es absorbida en la atmósfera mayormente por vapor de agua y nubes, radiándose hacia abajo como radiación de onda larga ($R_{L,abajo}$). La superficie del orbe recibe y emite radiación de onda larga, de manera que la $R_{L,arriba}$ menos la $R_{L,abajo}$ es igual a la radiación neta de onda larga (R_{nL}), llamándose la suma de R_{ns} y R_{nL} radiación neta (R_{n}). En un día sin nubes o sea un día de cielo claro, R_{s} es aproximadamente 75% del R_{a} y se llama la radiación de cielo claro R_{so} . La relación R_{s}/R_{so} es 1,0 en un día despejado y 0,33 para una cobertura densa de nubes (Allen *et al.* 2000).

El flux calórico del suelo (G), es la energía utilizada para calentar el suelo, siendo positivo cuando se calienta el suelo y negativo cuando el mismo se enfría. El flux es el término apropiado en física para la rata de flujo de una cantidad a través de una superficie (Soil Science Society of America 2001, Treybal 1988). En este caso, la cantidad es energía calórica. Durante el enfriamiento, la energía perdida por el suelo se debe agregar a la R_n, tal como se hace al evaluar la evapotranspiración y viceversa y como se resume en la ecuación del balance de energía para una superficie evapotranspirando (Allen *et al.* 2000, Ecuación 1 en dicha referencia).

$$R_n$$
-G- λ ET-H=0 (Ecuación 1)

En la Ecuación 1, ET es la evapotranspiración en mmdía⁻¹, λ es el calor latente de vaporización (2,45 MJmm⁻¹m⁻² a 20°C) y H es el calor sensible producido para calentar el aire y los cultivos en MJm⁻²día⁻¹.

El valor de G se puede considerar al nivel diario como el calentamiento del suelo durante el día y su enfriamiento durante la noche hasta 20-30 cm de profundidad o hasta 2 m al nivel mensual o estacional. Por ejemplo, en su modo de calentamiento estacional, el calor recibido durante un día es un poco más que aquel perdido durante la noche siguiente, por lo que se van agregando incrementos de calor diarios al suelo hasta 2 m de profundidad. El modo de enfriamiento ocurre en forma inversa al de calentamiento.

Se planteó el presente trabajo con el fin de analizar las relaciones entre las variables ambientales (temperatura, ambiente, lluvia, radiación solar e insolación), y la temperatura del suelo medida a 2, 5, 10, 20 y 50 cm de profundidad en la zona de Turrialba. De esta manera se identifica el comportamiento de la temperatura del suelo para relacionarlo con parámetros de comportamiento de plantas en función de esta variable. Se incluye una recapitulación teórica sobre temperatura del suelo para facilitarle al lector la comprensión del documento.

MATERIALES Y METODOS

La estación meteorológica del Centro Agronómico Tropical de Investigación de Enseñanza (CATIE) en Turrialba, está ubicada a una latitud de 9,88°N y 83,60°O, a una altura de 602 m. La estación contaba con un termógrafo a 1 m de altura, pluviógrafo, radiómetro solar y termómetros máximo y mínimo a 2, 5, 10, 20 y 50 cm de profundidad del suelo. La lluvia anual promedio es de 2662 mm y la radiación solar diaria promedio es de 17,4 MJm⁻². El área cercada de la estación tiene zacate y los termómetros se instalaron en una zona de suelo desnudo de la serie Margot (Typic Dystrudepts) con 32% de arcilla, 40% de limo y 28% de arena, densidad aparente de 0,88 Mgm⁻³, densidad de sólidos de 2,46 Mgm⁻³, capacidad de campo gravimétrica de 50%, pH en agua 5,3, MO de 6,4%, CIC 41 cmol(+)kg-1, y 18% de saturación de bases para el horizonte superficial (0-10 cm).

El análisis de los datos entre 1967-1972 (inclusive) se realizó graficando los promedios de temperatura de suelo, ambiente, radiación y lluvia. Para el cálculo del flux del calor mensual del suelo se usó la fórmula N°41 (Allen et al. 2000); asimismo; para estimar la radiación diurna y nocturna se usó el cuadro 2.8 de Allen et al. (2000). Para el cálculo del flux diurno de calor del suelo se hizo una regresión elaborada por el autor, para determinar la profundidad de penetración del calor diario. Las figuras de Trojer (de publicación limitada) se repitieron en este trabajo para su mayor difusión, dada la importancia

que tienen para la zona tropical Americana y para apreciar los análisis de este trabajo.

RESULTADOS Y DISCUSION

La Figura 1 muestra que la radiación solar es bimodal durante el año e influye sobre las medias [(máx+mín)2-1] de las temperaturas ambientales y del suelo (Forsythe 1999). La variación bimodal de la radiación está influenciada por las fechas del 16 de abril y 26 de agosto que corresponden a los momentos cuando los rayos del sol de mediodía caen perpendicularmente a la superficie del orbe a esta latitud y proporcionan la intensidad máxima. En cambio el día más largo del año, 21 de junio, tiene muy poco efecto, ya que la variación del largo del día es muy poca. Cabe notar que en los cuadros de radiación extraterrestre para 10°N también se muestra una variación bimodal con picos en abril y agosto (Doorenbos y Pruitt 1990).

Datos de Castro (1987) indican la misma tendencia en otras partes de Costa Rica, aunque en Guanacaste el pico en agosto está suprimido

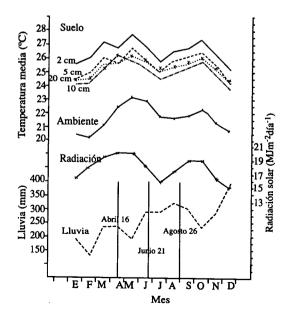


Fig. 1. Promedio de los datos meteorológicos de 1967-1972, Turrialba, Costa Rica.

por las altas lluvias y nubosidad acompañante y en Turrialba está desplazado y parcialmente suprimido por las lluvias. Las mismas tendencias se observan en datos del IITA, Nigeria, latitud 7,50°N (Harrison-Murray y Lal 1979) y del IRRI en Los Baños, Filipinas, latitud 14,17°N (Haws et al. 1983).

Al desplazarse del Ecuador hacia el Norte hay un acercamiento de las 2 máximas, hasta que los picos se funden en uno solo a la altura del Trópico de Cáncer (23,4°N), por lo que a partir de esta latitud hacia el norte hay una variación unimodal de la radiación y por lo tanto de las temperaturas. En este caso, la máxima tiende a acercarse a la fecha 21 de junio; lo mismo ocurre en el hemisferio sur con 6 meses de desplazamiento. Alvarado y Guevara (1988) estudiaron datos de la Estación Experimental de Chipiriri de Bolivia a 16,08°S y 250 m.s.n.m y sus datos muestran un acercamiento entre los picos bimodales del promedio de la temperatura ambiental diaria; en este caso, los promedios de noviembre, diciembre y enero son 26,2, 25,9 y 26,2°C, respectivamente y el aumento de temperatura durante el día más largo, el 21 de diciembre, tiene mayor importancia.

En la Figura 1 se nota que los picos de temperatura mensual ambiental en Turrialba, tienden a coincidir con los picos de la temperatura mensual del suelo de 2 a 50 cm de profundidad. Sin embargo, los picos de temperatura mensual ambiental (mayo y octubre) atrasan los picos de R_s mensual (abril y setiembre). Esto se observa en otros lugares tropicales (Harrison-Murray y Lal 1979, Haws *et al.* 1983) y en lugares templados (Hanks y Ashcroft 1980) en Logan, Utah donde hay un atraso de 6 semanas.

Este comportamiento se debe al almacenamiento acumulativo de calor a nivel mensual cuando el flux diurno es mayor que el flux nocturno durante el modo de calentamiento, a la salida y entrada igual de calor durante el mes con picos máximos o mínimos (cuando el flux diurno iguala al flux nocturno) y a la pérdida acumulativa de calor durante el modo de enfriamiento (cuando el flux diurno es menor que el flux nocturno). Lo anterior se explica con el modelo de almacenamiento dinámico estacionario en Miller y Thompson (1970) y es una razón por la cual se ha criticado fórmulas de evapotranspiración como la de Thorthwaite, las cuales dependen solamente de la temperatura (Chang 1961, Pruitt y Angus 1961).

Los cálculos de G mensual para Turrialba se hicieron siguiendo el modelo descrito en el cuadro 1; en la Figura 2 se muestra el modelo del flux diurno comparado con el flux nocturno del suelo, considerando los ajustes de su diferencia establecidos en el cuadro 1. El cuadro 2 explica

Cuadro	1.	Flux de calor mensua	l del suelo en	Turrialba, Costa	Rica.

Mes	Temp. prom. ambiental del mes posterior T _p , °C	Temp. prom. ambiental del mes anterior T _a ., °C	Flux mensual de calor del suelo MJm ⁻² día ⁻¹ , usando 0,171 (T _p -T _{at})*
Marzo	22,5	20,2	0,393
Abril	23,2	21,1	0,147
Junio	21,7	23,2	-0,324
Julio	21,6	22,9	-0,222
Setiembre	22,3	21,6	0,049
Noviembre	20,6	22,3	-0,29
Diciembre	20,4	21,2	-0,137
Enero	20,2	20,6	-0,068

^{*} Fórmula No.41 de Allen et al. (2000).

Flux= $C^*(T_2-T_1)^*$ Prof. del suelo por intervalo de tiempo en días. C es la capacidad calorífica volumétrica del suelo, 2,56 MJm⁻³ °C⁻¹ Prof. = 2 m, intervalo = 30 días. T_1 = temperatura, al inicio del mes y T_2 = temperatura al final del mes. (T_2-T_1) = $1/2(T_p-T_{pt})$

el cálculo del flux diurno de los datos meteorológicos y el cuadro 3 su cálculo de los datos de temperatura del suelo, valores comparables a aquellos medidos por placas metálicas de flux de calor. Montieth (1958) en Inglaterra, durante el mes de junio encontró que el flux diurno es casi igual al flux nocturno con un valor de 2,1 MJm⁻² y Lascano (2000) en Texas, U.S.A., durante el mes de agosto, encontró valores de 2,2 en las camas de siembra y 5,2 MJm⁻² en los surcos. Estos meses se aproximan a la época julio-agosto cuando ocurre el máximo anual unimodal de temperatura ambiental de latitudes más al norte y explica la casi igualdad de los fluxs diurno y nocturno.

Montieth (1958), usó R_n (noche) para estimar el flux nocturno en un suelo aparentemente seco, bajo condiciones nubladas pero sin lluvia reciente. Si se aplica esta fórmula a los datos del cuadro 2, se nota que el flux nocturno estimado es algo menor que los valores en la figura 2. Las

diferencias se pueden explicar por el enfriamiento del suelo por procesos diferentes de la radiación tal como la advección de agua fría de la lluvia que penetra el suelo y por la evaporación del suelo, el cual tiende a estar a capacidad de campo casi todo el año. Hanks et al. (1967) han demostrado el enfriamiento sustancial del suelo provocado por la evaporación del suelo mojado; asimismo, la Taxonomía de Suelos menciona de un enfriamiento de hasta 8°C por evaporación (Soil Survey Staff 1999).

Montieth (1979), indica que la temperatura media anual del suelo debe ser casi independiente de la profundidad del mismo si se presume que no hay un almacenamiento neto de calor en la tierra de un año al otro. El almacenamiento anual de calor en el suelo será:

 $\int k(\partial T/\partial z)dt=0$ (Ecuación 2)

Cuadro 2. Cálculo de la radiación neta diurna y nocturna, y el Flux diurno de calor del suelo de los datos meteorológicos de 1967-1972 de Turrialba, Costa Rica.

Mes	Feb.	Abr.	May.	Jul.	Ago.	Oct.	Dic.
T. prom. máx. °C	25,4	26,8	27,6	26,7	27	26,9	25,4
T. prom. mín. °C	16,6	19,3	18,7	18,7	18,4	18,9	17,3
T. prom. prom. °C	20,2	22,5	23,2	21,7	21,6	22,3	20,6
Radiación solar, R _s , MJm ⁻² día ⁻¹	18,1	20,1	20,0	15,8	17,4	19,0	15,0
Radiación extraterrestre, R _a , MJm ⁻² día ⁻¹	34,5	37,9	37,6	37,1	37,5	35,1	31,0
Radiación cielo claro, R _{so} =R _a (0,75+z*2*10 ⁻⁵), z=altura, m	25,9	28,4	28,2	27,8	28,1	26,3	23,2
R_{s}/R_{so}	0,70	0,71	0,71	0,57	0,62	0,72	0.65
HR (prom.), %	85,9	85,4	87,4	90,0	89,2	89.3	89,5
HR (máx.), %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
HR (mín.), %	58,7	58,0	60,7	64,5	64,8	63,6	66,4
Presión de vapor a T _{mín.} (e _a) _{T,mín.} KPa.	1,87	2,24	2,16	2,16	2,12	2,18	1,97
(e _a) _{T.máx} , KPa.	1,9	2,01	2,24	2,26	2,3	2,25	2,15
$f(R_s/R_{so}) = 1,35(R_s/R_{so}) - 0,35$	0,6	0,608	0,608	0,42	0,49	0,622	0,53
$f\{(e_a)_{T,máx}\} = 0.34-0.14\{(e_a)_{T,máx}\}^{1/2}$	0,147	0,14	0,13	0,129	0,128	0,13	0,135
$f\{(e_a)_{T,min}\}=0.34-0.14\{(e_a)_{T,min}\}^{1/2}$	0,147	0,13	0,134	0,134	0.136	0,133	0,143
Rad. de onda larga a T _{min} LR _{Tmin} MJm ⁻² dia ⁻¹	34,56	35,87	35,58	35,58	35,43	35.67	34,9
LR _{Tmáx} ,MJm ⁻² día ⁻¹ (ver Allen et al. 2000. Cuadro 2.8)	39,06	39,69	40,11	39,64	39,8	39,94	38,9
$LRNeto_{T,máx} = LR_{T,máx} * f\{(e_a)_{T,máx}\} * f(R_s/R_{so}) MJm^{-2}día^{-1}$	3,44	3,38	3,17	2,15	2,5	3,22	2,78
$LRNeto_{T.min.} = LR_{T.min.} *f\{(e_a)_{T.min.}\} *f(R_s/R_{so})$	3,05	2,83	2,9	2,0	2,36	2,95	2,64
LRNeto _{noche,12 h} = $1/2$ {3LRN _{T.máx.} +5LRN _{T.mín.} }8 ⁻¹ , MJm ⁻² (12 h) ⁻¹ *	1,6	1,52	1,5	1,03	1,21	1,52	1,35
LRNeto _{dia,12 h} = $1/2\{5LRN_{T,máx} + 3LRN_{T,min}\}/8$, MJm ⁻² (12 h) ^{-1*}	1,65	1,59	1,84	1,05	1,22	1,56	1,36
Rad.solar neta, $R_{sn} = (1-\alpha)R_{sn} = albedo = 0,2$	14,5	16,1	16,0	12,6	13,9	15,2	12,0
Rad.neta(día,12 h), R_n (día)={ R_{sn} -RNeto _{día 12 h} }	12,8	14,5	14,16	11,5	12,7	13,6	10,6
$R_n(\text{noche}) = -LRNeto_{\text{noche}, 12h} MJm^{-2}(12 \text{ h})^{-1}$	1,6	1,52	1,50	1,03	1,21	1,52	1,35
Flux del suelo (día, 12 h)= 0,2R _n (día) condición nublada (ver Montieth 1958)	2,56	2,9	2,83	2,3	2,54	2,72	2,12

^{*} De acuerdo con el promedio ponderado de temperatura (aquí, la radiación neta asociada) para la zona tropical usando el modelo: amanecer y temperatura mínima 6 h, temperatura máxima 14 h, atardecer 18 h.

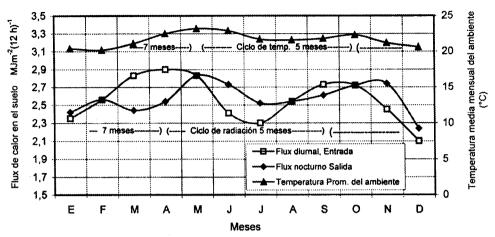


Fig. 2. El flux diurno (tomado del cuadro 2) comparado con el flux nocturno (estimado por las diferencias del cuadro 1) del suelo durante 2 épocas de calentamiento y 2 épocas de enfriamiento ambiental y del suelo.

Cuadro 3. Cálculo del Flux diurno de calor del suelo (G) de las temperaturas de suelo del cuadro 4.

Mes	A	В	CοΔT _s °C	R ²	P cm	S cm x °C	ΔT _s (a 18 h) °C	G _{12h} MJm ⁻² (12 h) ⁻¹
Enero	0,0119	-0,8805	14,3	0,9787	24,1	144,4	10,1	2,61
Febrero	0.0136	-0,9826	15,1	0,9653	22,3	142,7	10,7	2,58
Marzo	0,0144	-1,0347	15,8	0,9635	22,3	148,1	11,1	2,68
Abril	0,0095	-0,7426	13,3	0,9820	27,9	150,8	9,4	2,72
Mayo	0,0133	-0,9569	14,7	0,9703	22,0	139,0	10,4	2,51
Junio	0,0120	-0,8660	13,4	0,9644	22,2	127,8	9,5	2,31
Julio	0,0105	-0,7598	11,8	0,9686	22,5	113,0	8,3	2,04
Agosto	0,0128	-0,9213	14,1	0,9795	22,1	132,7	9,9	2,40
Setiembre	0,0119	-0,8791	14,2	0,9777	23,8	142,4	10,0	2,57
Octubre	0,0112	-0,8347	13,9	0,9727	25,6	145,0	9,8	2,62
Noviembre	0.0111	-0,8150	13,2	0,9709	24,6	133,2	9,3	2,41
Diciembre	0,0110	-0,7990	12,6	0,9672	23,1	123,1	8,9	2,20

El modelo calcula el calor neto que entra en el perfil entre 6 h y 18 h, hasta la profundidad P donde no hay cambio de temperatura diaria. Las P son determinadas por regresiones de R^2 muy altas. Sea x=prof. cm; $y=T_{máx}$. $T_{mín}$. (ΔT), de un día para una profundidad dada. Regresión es: $y=Ax^2+Bx+C$. Cuando x=0, $y=C=\Delta T$ (superficie)= ΔT_s . Modelo del calentamiento de la superficie del suelo: $T_{mín}$, amanecer 6 h; $T_{máx}$. 13 h; T_{18h} , atardecer 18 h. ΔT_s (a 13 h) se denomina ΔT_s : x=prof. de penetración de calor diaria, P, cuando y=0. Integral y=0 T_s (0 a P)= T_s (1 a P)= T_s (2 a P)= T_s (3 b) se compara con el área T_s (2 a P)= T_s (3 b) de la disminución de T_s (3 c) T_s (4 c) T_s (6 c) T_s (7 c) T_s (8 c) T_s (9 c)

 $G_{7h}=2,56*P*{S/(P*\Delta T_s/2)}(\Delta T_s/2)=2,56*S(en m x°C)$, $MJm^2(7 h)^{-1}$. 7 h= lapso de tiempo entre 6 h y 13 h. Reducción de ΔT_s al valor parcialmente enfriado, $\Delta T_s(a18h)=\Delta T_s*5/17°C$. $\Delta T_s(a18h)=\Delta T_s*-1$ la reducción.

 $G_{12h} = (\Delta T_s (a18h)/2) *2,56P * S/(P * \Delta T_s/2), MJm^{-2}(12 h)^{-1}$. 12 h= lapso de tiempo entre 6 h y 18 h.

En la Ecuación 2, k es la conductividad térmica, $\partial T/\partial z$ la gradiente de temperatura y t es el tiempo. Como k es finito, se concluye que la media de la gradiente de temperatura tiene que ser cero. O sea:

$$\{\int (\partial T/\partial z)dt\} \div \int dt=0$$
 (Ecuación 3)

Montieth (1979) y la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff 1999) citan varios ejemplos donde las medias anuales de la temperatura del

suelo varían muy poco con la profundidad, si se ignoran los primeros centímetros del mismo. En el caso del presente trabajo, se logra dicha condición ignorando los primeros 10 cm de suelo. La Figura 3 muestra la variación de las medias de temperatura anuales y mensuales con la profundidad del suelo. Las medias de temperatura anuales se encuentran en una posición central con respecto a las medias de temperatura mensuales y muestran una tendencia de aumento en los primeros 10 cm del suelo. La temperatura a 10 cm es la mínima, sugiriendo una salida de calor de esa profundidad. Esto se explica en la Figura 4 (mes de mucha lluvia) y la Figura 5 (mes de poca lluvia) donde una lluvia fuerte caí-

da en la noche (después de las 4 p.m.) y su nubosidad acompañante el día siguiente, enfría el suelo hasta 20 cm de profundidad, con un recalentamiento posterior de los primeros 10 cm de suelo, dando una tendencia de un mínimo a 10 cm de profundidad, que se observa en los valores mensuales. Esto demuestra un enfriamiento en el subsuelo por una advección de agua fría por la penetración de las lluvias. La posición central de las medias anuales con respecto a las mensuales indica que, para una profundidad dada, el cambio neto de calor después de un año será cero. Sin embargo, el modelo indicado por Montieth no incluye la transferencia de calor por advección.

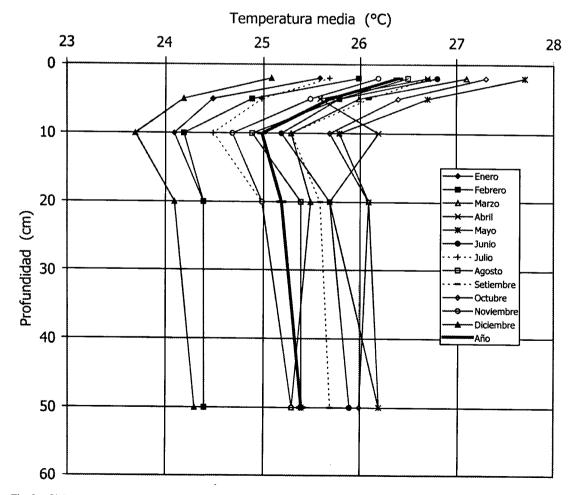


Fig. 3. Ciclo anual de temperaturas medias mensuales del suelo vs. la profundidad de los datos del cuadro 4.



Las medias mensuales de la temperatura del ambiente y del suelo en la estación de Turrialba se incluyen en la figura 1, en la cual se nota una tendencia a mayores gradientes (más separación de los puntos) cuando hay picos de radiación solar y temperatura y de menor gradiente (menor separación de puntos) en los bajos de radiación. En el cuadro 4 se muestra los promedios de los máximos y mínimos para cada profundidad (Forsythe 1999). En el caso de Turrialba, la temperatura media anual del suelo medida a 50 cm de profundidad (T₅₀), menos el promedio de la temperatura ambiental (T_o) es de 3,8°C, una diferencia similar a la mencionada por Ramírez (1982) de 2,2°C para Diamantes (R_e anual de 13,5 MJm⁻²día⁻¹), 3°C para Nicoya (17,5 MJm⁻²día⁻¹) y 3,9°C para Puntarenas (17,5 $MJm^{-2}d(a^{-1})$. Estos valores de $(T_{50}-T_a)$ son parecidos a las diferencias de 3 a 4°C encontradas en 26 lugares de Venezuela (2-12°N) por Comerma y Sánchez (1982) y mayores al valor de 1°C mencionado para la mayoría de los U.S.A. (Soil Survey Staff 1999).

En el cuadro 4 se observa que la variación máxima estacional de la temperatura del suelo a 50 cm de profundidad es de 1,9°C. Este dato es similar al de 2°C encontrado por Comerma y Sánchez (1982) para 65 localidades en Venezuela, por lo que el régimen de temperatura del suelo clasifica como isohipertérmico, según la Taxonomía del Suelo (Soil Survey Staff 1999).

Si se utiliza un valor anual de $R_s=17.5$ MGm⁻²día⁻¹ (Castro 1987) para Turrialba y los datos mencionados en los otros 3 sitios en Costa Rica, se puede establecer la ecuación de regresión (4), entre R_s como eje X y $(T_{50}-T_a)$ como eje Y.

$$Y = 0.0185 X^{1.8358} (R^2 = 0.8029)$$
 (Ecuación 4)

En los cuadros 5 y 6 y en las figuras 6 y 7 (Forsythe 1999) se muestra los datos de temperatura, precipitación y radiación solar de un mes con poca lluvia (marzo 1972) y otro con mucha lluvia (agosto 1972). En marzo 1972, se observa efectos fuertes de las temperaturas causando picos altos y bajos en respuesta a la radiación solar.

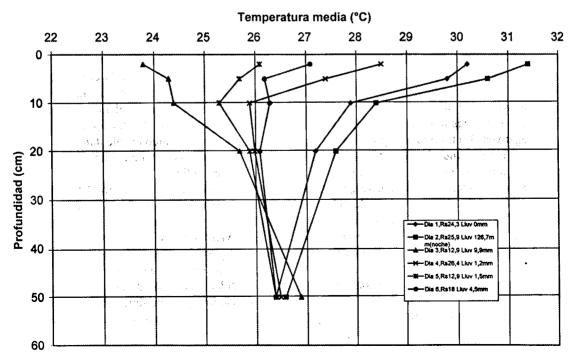


Fig. 4. Temperaturas medias del suelo vs. la profundidad para algunos días de agosto, 1972. Muestra el enfriamiento del suelo por la penetración de agua fría de una lluvia fuerte y el recalentamiento del segmento de 0-10 cm.

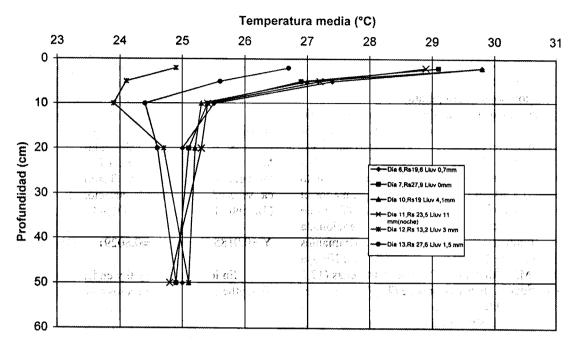


Fig. 5. Temperaturas medias del suelo vs. la profundidad para algunos días de marzo, 1972. Muestra el enfriamiento del suelo por la penetración de agua fría de una lluvia ligera-moderada, y el recalentamiento del segmento de 0-10 cm.

Durante los picos bajos, además de reducirse, las gradientes pueden ser negativas indicando enfriamiento neto, efecto fácil de observar en las figuras 4 y 5. La radiación solar puede ser afectada por las nubes o la lluvia diurna, no así cuando las lluvias caen durante la noche; este efecto se nota en los datos para el mes de agosto 1972, durante el cual las gradientes son más leves y con más valores negativos. En las figuras 7 y 4 puede observarse que la lluvia muy fuerte el día 2 del mes de agosto no afectó el pico de radiación solar ni la temperatura del suelo, lo que sugiere que la lluvia ocurrió en la noche. La baja de la radiación solar el día 3 estaba acompañada por una baja de las temperaturas. Se sugiere que el desarrollo de una gradiente negativa fuerte fue estimulado por la lluvia fuerte durante la noche del día 2, que enfrió las capas de 2, 5, 10 y 20 cm con agua más fría infiltrada.

En marzo cayeron 40,7 mm de lluvia y la media de radiación solar fue de 22,7 MJm⁻²día⁻¹. Las medias de las temperaturas máximas en el suelo fueron 37,4°C a 2 cm, 33,3°C a 5 cm, 29°C a 10 cm y 26,7°C a 20 cm. En agosto cayeron 363

mm de lluvia (127 mm en un día), y la media de radiación solar fue de 17,3 MJm⁻²día⁻¹. Las medias de las temperaturas máximas en el suelo fueron 34,9°C a 2 cm, 33,8°C a 5 cm, 29,3°C a 10 cm y 27,1 a 20 cm. Solamente la capa de 2 cm de profundidad mostró un aumento significativo de la temperatura en marzo, el mes más seco. El efecto dominante fue el calentamiento acumulado en agosto superando el calentamiento acumulado en marzo (ver temperatura promedio del ambiente en la figura 2).

En el cuadro 4 se muestra datos de temperaturas máximas y mínimas del suelo en Turrialba a nivel mensual y en los cuadros 5 y 6 a nivel diario. Van Wijk y de Vries (1963) al estudiar los cambios periódicos de la temperatura del suelo, encontraron que el cambio de esta variable a una profundidad dada durante el ciclo de un día tiene un máximo y un mínimo y la diferencia entre ellos define la amplitud A de la onda y esta a su vez es definida por una función seno. La desviación de la temperatura de su media es A sen (ω t), donde t es el tiempo y ω la frecuencia angular que es $(2\pi/24)h^{-1}$ para una fluctuación diaria y

Cuadro 4. Datos meterológicos. Promedios de 1967-1972, Turrialba, Costa Rica.

Lluvia Temperatura Rad. (mm) ambiente (°C) solar 7 a.m7 a.m. Máx Mín Med	Temperatura ambiente (°C)	1.8	1.8	Rad. solar (MJm ⁻² día ⁻¹)		Insolación (h)	Evap. tanque A (mm)	Ter su Máx	Temperatura suelo (°C) 2 cm	E ()	Ten suk Máx	Temperatura suelo (°C) 5 cm	a Med	Ter su	Suelo (°C) 10 cm	Med	Tem sue 2	Temperatura suelo (°C) 20 cm áx. Mín.	Med	Temperatura suelo (°C) 50 cm
Max. Mill: Mcd.	MIII. MICH.	lylou.					- 1													
25,5 16,9 20,4 16,2 4,6	16,9 20,4 16,2 4,6	20,4 16,2 4,6	16,2 4,6	4,6	4,6 111,6	9,111		32,6	5	25,6	29,1	6,61	24.5	20,6	21,6	74,1	25,4	23,4	74,4	74,4
25,4 16,6 20,2 18,1 4,9	16,6 20,2 18,1 4,9	20,2 18,1 4,9	18,1 4,9	4,9	4,9 113,3	113,3		33,3	18,9	28	29,7	6,61	24,9	26,9	21,6	24,2	25,4	23,5	24,4	24,4
26,3 17,1 21,1 19,5 4,8	17,1 21,1 19,5 4,8	21,1 19,5 4,8	19,5 4,8	4,8	4,8 137,8	137,8		34,6	2,61	27,1	31,1	21	92	28,1	22,6	25,3	26,5	24,6	25,5	25,3
26,8 19,3 22,5 20,1 5	19,3 22,5 20,1 5	22,5 20,1 5	20,1 5	S	5 134	134		32,5	21,5	7,92	31	20,2	25,6	7,62	7,22	26,2	27,1	25,2	25,7	26,2
18,7	18,7 23,2 20 5	23,2 20 5	20 5	S	5 137	137		34,7	20,8	7,72	31,6	21,9	26,7	28,4	23,2	25,8	27,1	25,3	26,1	26,2
27,5 18,8 22,9 18,1 4,6	18,8 22,9 18,1 4,6	22,9 18,1 4,6	18,1 4,6	18,1 4,6 120,3	4,6 120,3	120,3		33,2	20,4	26,8	30,2	21,4	25,8	27,6	22,9	25.2	26,6	24,8	25,7	25,9
26,7 18,7 21,7 15,8 3,6	18,7 21,7 15,8 3,6	21,7 15,8 3,6	15,8 3,6	15,8 3,6 105,9	3,6 105,9	105,9		31,3	20,1	25,7	83	21,1	25	26,6	22,3	24,5	25,8	24,2	22	25,3
27 18,4 21,6 17,4 4,4	18,4 21,6 17,4 4,4	21,6 17,4 4,4	17,4 4,4	4,4		110		33	8	26,5	30,5	21	25,8	27,4	22,4	24,9	26,1	24,6	25,4	25,4
27,3 18,4 21,8 18,9 4,5	18,4 21,8 18,9 4,5	21,8 18,9 4,5	18,9 4,5	4.5		125,6		33,4	20,1	26,7	30,9	21,3	26,1	88	22,5	25,3	26,7	24,6	25,6	25,7
26,9 18,9 22,3 19 4,9	18,9 22,3 19 4,9	22,3 19 4,9	19 4,9	4,9		127,1		33,9	8'02	27,3	31,3	21,6	26,4	28,4	23	25,7	27,1	24,6	26,1	3 2
26 18,1 21,2 16,2 4,4	18,1 21,2 16,2 4,4	21,2 16,2 4,4	16,2 4,4	4,4	4,4 98,5	5,86		32,4	6,61	26,2	29,8	20,9	25,5	27,3	22,3	24.7	26,1	77	22	25,3
25,4 17,3 20,6 15 4,2	17,3 20,6 15 4,2	20,6 15 4,2	15 4,2			8 8		31	16	25,1	28,3	20	24,2	92	21,4	23,7	23	23,2	24,1	24,3
26,6 18,1 21,6 17,8 4,6 117,4	18,1 21,6 17,8 4,6	21,6 17,8 4,6	17,8 4,6	_	_	117,4		33	8	26,4	30,2	20,8	25,7	27,6	22,4	23	26,9	24,3	25.2	25,4

Fecha	Precipitación (mm)		emperat ambien		Rad. solar (MJm ⁻² día ⁻¹)				·		Tempe	raturas d	lel sue	elo (°C)				
	7 a.m7 a.m		(°C)		,	-	2 cm			5 cm			10 cm			20 cm		50 cm
		Máx.	Mín.	Med.		Máx.	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Med.
1	0,7	26,2	15,7	20,9	27,6	38,1	17,8	27,9	33,3	19,3	26,3	28,2	21,2	24,7	25,6	22,7	24,1	24,0
2	0,0	26,3	17,7	21,4	17,7	36,3	18,0	27,3	31,6	19,3	25,4	27,6	21,1	24,3	25,2	23,0	24,1	24,2
3	0,0	27,4	19,4	22,3	27,6	41,6	20,7	31,1	35,2	21,4	28,3	30,2	22,5	26,3	27,0	24,0	25,5	24,5
4	0,0	25,7	15,8	21,2	22,4	38,4	18,8	28,6	33,4	20,8	27,1	29,0	22,9	25,9	26,9	24,4	25,6	24,6
5 .	0,0	23,2	15,7	19,8	10,3	31,0	19,2	25,1	28,0	20,8	24,4	26,4	22,8	24,6	25,9	25,0	25,4	25,0
6	0,7	26,9	17,4	20,3	19,6	40,2	19,5	29,8	34,0	20,8	27,4	28,7	22,4	25,5	26,0	24,1	25,0	25,0
7	0,0	27,3	13,5	20,4	27,9	41,8	16,4	29,1	35,4	18,6	26,9	29,7	21,1	25,4	26,5	23,8	25,1	24,9
. , 8	2,0	24,6	14,5	19,1	16,7	37,4	16,8	27,1	31,3	18,9	25,1	27,4	21,5	24,4	26,2	24,3	25,2	25,0
9	0,0	26,5	16,3	20,6	28,5	40,8	18,3	29,5	35,5	20,0	27,7	30,2	22,1	26,1	26,8	24,0	25,4	25,0
10	4,1	26,0	17,2	19,7	19,0	40,4	19,3	29,8	33,6	20,4	27,0	28,6	22,1	25,3	26,4	24,1	25,2	25,1
11	11,0	26,0	17,1	19,9	23,5	38,2	19,6	28,9	33,6	20,8	27,2	28,5	22,3	25,4	26,2	24,4	25,3	24,8
12	3,0	23,0	17,2	18,2	13,2	30,2	19,6	24,9	27,3	20,9	24,1	25,8	22,1	23,9	25,2	24,3	24,7	25,1
13	1,5	25,0	17,0	20,2	27,6	34,5	19,0	26,7	31,1	20,1	25,6	27,4	21,5	24,4	25,7	23,5	24,6	24,9
14	3,0	24,7	18,5	19,7	20,7	35,2	19,6	27,4	32,0	20,1	26,0	27,6	21,4	24,5	25,8	23,4	24,6	24,8
15	0,7	25,9	17,5	20,6	19,3	33,5	19,6	26,5	30,3	20,7	25,5	26,8	22,0	24,4	25,6	23,8	24,7	24,7
16	0,0	27,3	15,8	21,2	30,7	38,8	18,1	28,4	34,2	19,6	26,9	29,6	21,4	25,5	26,5	23,6	25,0	24,8
17 -	0,0	27,7	15,0	21,2	30,4	41,0	17,6	29,3	35,6	19,6	27,6	30,7	22,1	26,4	27,2	24,5	25,8	24,9
18	0,0	27,3	16,0	21,3	30,4	42,6	18,0	30,3	36,6	19,6	28,1	31,2	21,9	26,5	27,8	24,4	26,1	25,2
19	0,0	27,7	17,3	22,2	30,5	43,2	19,9	31,5	37,3	20,9	29,1	32,0	22,4	27,2	28,2	24,8	26.5	25,5
20	7,4	27,4	20,0	22,0	17,5	39,2	20,7	29,9	34,2	22,0	28,1	30,3	24,0	27,1	28,2	26,0	27,1	25,9
21	3,9	23,2	19,4	20,6	8,0	28,8	21,8	25,3	27,6	22,9	25,2	26,5	24,3	25,4	26,8	26,1	26,4	25,9
22	1,4	24,2	19,5	20,3	7,3	29,4	21,2	25,3	27,3	22,1	24,7	25,8	23,0	24,4	25,4	24,7	25,0	25,7
23	0,3	26,2	14,8	20,1	30,7	35,9	17,0	26,4	33,0	18,7	25,8	28,6	20,7	24,6	26,1	23,2	24,6	25,3
24	0,0	26,2	17,1	20,9	20,1	35,2	20,0	27,6	31,7	21,4	26,5	28,0	22,7	25,3	26,2	24,6	25,4	25,2
25	0,0	27,7	14,6	21,1	30,3	41.0	17,3	29,1	35,7	19,3	27,5	30,3	21,8	26,0	27,0	24,3	25,6	25,2
26	0,0	27.9	17,6	22,0	22,6	39,9	17,4	28,9	34.6	19,4	27,0	30,4	21,7	26,0	27,7	24,4	26,0	25,4
27	0,2	25,5	16,5	21,2	28,3	37,5	19,9	28,7	32,6	21,8	27,2	29,0	23,8	26,4	27,0	25,6	26,3	25,6
28	0,0	27,8	16,8	22,1	28,3	42,8	19,6	31,2	36,8	21,4	29,1	31,5	23,4	27,5	28,3	25,4	26,8	25,8
29	0,0	28,1	19,4	22,4	18,7	39,9	21,1	30,4	34,6	22,0	28,3	30,6	23,8	27,3	28,0	25,4	26,8	25,8 25,0
30	0,0	29,0	17,2	22,7	28,9	44,0	20,2	32,1	37,6	22,0	29,8	32,4	24.0	28,2	28,9	26,1	27,5	26,2
31	0,0	29,0	18,7	23,3	18,3	44,5	21,2	32,8	38,0	22,0	30,0	33,0	23,9	28,4	29,6	26,0	27,3	26,2 26,3
Media	1,31	26,35	16,97	21,0	22,7	37,4	19,1	28,6	33,3	20,5	26,9	29,0	22,3	25,7	26,7	24,4	25,5	25,1

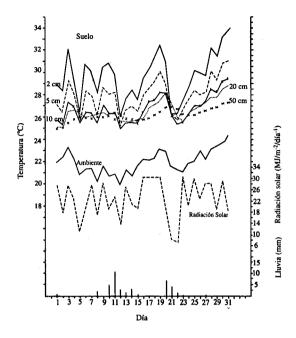


Fig. 6. Datos meteorológicos marzo de 1972, Turrialba, Costa Rica.

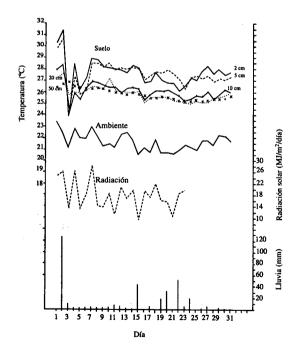


Fig. 7. Datos meteorológicos agosto de 1972, Turrialba, Costa Rica.

(2π/365)día⁻¹ para una fluctuación anual, la cual se aplicaría al cambio de la temperatura media durante el año. El modelo desarrollado por Van Wijk y de Vries (1963) se cumple cuando la fluctuación anual de la temperatura es unimodal y no se puede aplicar a los cambios bimodales, los cuales han sido discutidos por Krishman y Kushwaha (1972) usando términos de una serie Fourier.

Para generar una fluctuación diaria o anual se usa la siguiente ecuación:

$$T = T_m + A \operatorname{sen}(\omega t)$$
 (Ecuación 5)

Donde T es la temperatura al lapso de tiempo t, T_m es la temperatura media y A es la amplitud (máx-mín)2⁻¹. Fluker (1958) ha usado dicha ecuación para generar modelos de la fluctuación anual de la temperatura media diaria en la Universidad Texas A&M (32,8°N) y Amézquita *et al.* (1993) la han usado para generar modelos de fluctuación diaria en IITA, Nigeria (7,50°N).

Desde el punto de vista agrícola, la fluctuación diaria proporciona información realista sobre el ambiente del suelo para el crecimiento de la planta y los microorganismos. Montieth (1979) ha señalado la importancia de distinguir la respuesta de plantas a temperaturas constantes, las cuales comúnmente se determinan en experimentos controlados para obtener máximas, mínimas y óptimas (Mc Michael y Burke 1998). Con temperaturas fluctuantes, donde cada ciclo diario tiene varias dosis de horas-grados, u horas acumuladas dentro de un rango de temperatura, los modelos de ondas de fluctuación facilitan el análisis.

La observación de límites críticos térmicos ambientales en el campo, automáticamente incluye las fluctuaciones diarias y estacionales (Trojer 1966a, Oficina del Café 1975). En Colombia (3°S-13°N) se ha encontrado un ecuador climático (desplazamiento de la estación seca de 6 meses) a 4°N del lado occidental del país y a 6°N del lado oriental (representado por la latitud 5°N en la figura 8); bajo estas condiciones, en el norte del país (10-12°N) hay una estación seca durante enero-marzo, similar a la que ocurre en Centroamérica. Al atravesar el país en sentido de norte a sur cruzando el ecuador climático, se observa un desplazamiento

Fecha	Precipitación		mperat		Radiación solar						Tempera	turas del	suelo	(°C)				
	(mm) 7 a.m7 a.m	a	mbien (°C)	ie	(MJm ⁻² día ⁻¹)		2 cm		<u></u>	5 cm			10 cm	l		20 cm	1	50 cm
		Máx.	Mín.	Med.		Máx.	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Med.
1	0,0	29,2	19,2	23,4	24,3	38,8	21,6	30,2	36,7	23,0	29,8	31,5	24,4	27,9	28,6	25,9	27,2	26,4
2	126,7	27,8	20,2	22,5	25,9	40,3	22,5	31,4	38,1	23,1	30,6	32,6	24,3	28,4	29,2	26,1	27,6	26,6
3	9,9	25,2	19,7	21,1	12,9	30,0	17,6	23,8	28,6	20,0	24,3	26,6	22,3	24,4	26,4	25,0	2,5	26,9
4	1,2	29,2	19,0	22,8	26,4	36,4	20,6	28,5	34,2	20,7	27,4	29,8	22,1	25,9	27,2	24,9	26.0	26,5
5	1,5	26,5	19,4	22,0	12,9	31,0	21,2	26,1	29,6	21,8	25,7	27,6	23,0	25,3	26,8	25,0	25,9	26,4
6	4,5	26,5	20,2	21,9	18,0	32,2	22,1	27,1	29,6	22,9	26,2	28,8	23,9	26,3	26,8	25,4	26,1	26,4
7	4,1	28,2	19,4	22,9	28,4	36,4	21,4	28,9	34,6	22,4	28,5	30,3	23,6	26,9	27,6	25,4	26,5	26,3
8	0,7	26,5	19,1	22,1	14,2	36,3	21,3	28,8	34,7	22,4	28,5	30,2	23,4	26,8	27,6	25,2	26,4	26,4
'9	1,7	25,1	18,5	21,3	13,8	36,0	20,5	28,2	34,6	21,7	28,1	30,2	23,1	26,6	27,5	25,2	26,3	26,3
10	4,8	26,7	18,6	21,4	18,2	35,7	20,6	28,1	35,4	21,6	28,5	30,0	22,8	26,4	29,6	24,8	27,2	26,1
11	7,7	25,2	18,9	21,1	11,1	38,2	19,6	28,9	33,6	20,8	27,2	28,5	22,3	25,4	26,2	24,4	25,3	24,8
12	7,5	27,3	19,2	22,3	20,9	35,1	20,7	27,9	34,6	21,6	28,1	29,1	22,7	25.9	27,4	24,6	26,0	25,9
13	0,6	25,6	20,2	22,4	16,8	34,9	20,6	27,7	34,6	21,4	28,0	30,0	22,6	26,3	27,5	24,6	26,0	25,8
14	1,9	26,8	19,0	21,8	19,6	36,4	20,2	28,3	34,5	21,7	28,1	30,0	22,8	26,4	27,4	24,5	25,9	25,9
15	42,4	26,0	18,2	20,5	9,42	35,7	20,5	28,1	34,5	21,5	28,0	29,8	22,8	26,3	27,2	24,9	26,0	25,8
16	0,0	26,5	18,0	21,1	19,2	35,4	18,2	26.8	34,4	19,8	27,1		20,8	25,3	27,3	22.9	25,1	25,7
17	6,6	26,8	18,0	20,7	17,1	35,0	8,9	26,9	34,4	20,5	27,4	29,8	21,8	25,8	27,3	23,8	25,5	25,8
18	0,0	27,3	18,5	21,9	22,1	34,9	20,5	27,7	34,3	21,4	27,8	29,7	22,5	26,1	27,0	24,3	25,6	25,5
19	18,6	26,3	17,8	20,7	15,8	34,0	20,1	27,0	34,0	21,4	27,7	29,4	22,9	26,1	26,9	24,4	25,6	25,6
20	33,0	25,5	19,4	20,7	15,7	33,7	19,9	26,8	34,0	20,8	27,9	29,3	23,2	26,2	26,8	24,4	25,6	25,5
21	0,3	23,5	18,7	20,6	10,5	33,4	20,3	26,8	34,0	21,2	27,6		22,7	25,9	26,6	24,0	25,3	25,4
22	52,8	26,7	17,0	20,9	18,8	33,4	18,9	26,1	34,1	20,2	27,0		22,5	25,7	26,7	23,8	25,3	25,3
23	5,7	27,2	18,3	21,4	19,6	34.6	18,4	26,5	33,9	18,6	26,2		21,8	25,7	26,6	23,7	25,1	25,3
24	18,7	27,2	18,7	21,1		34,2	20,2	27,2	33,9	20,7	27,3		22,1	25,4		23,7	25,1	25,2
25	0,5	26,5	17,8	20,9		34,0	20,1	27,0	33,8	21,0	27,4		22,9	25,7		24,0	25,0	25,2
26	2,0	27,3	18,8	21,8		35,2	20,4	27,8	33,6	20,9	27,2	•	22,7	25,6		24,0	25,1	25,2
27	2,8	27,5	19,6	21,8		35,8	20,4	28,3	33,6	21,2	27,4		22,7	26,1		24,0	25,1	25,2 25,3
28	0,0	25,8	17,9	21,4	 ;	35,3	20,0	27,6	33,7	20,2	26,9	-	22,4	25,4		24,1	25,1	,
29	3,3	27,5	18,7	22,3		35,9	20,0	28.0	34,0	20,2	20,9	-	22,4	25,4		24,0	25,5 25,6	25,4
30	1,3	27,5	20,1	22,3	11,1	34,2	20,1	27,5	34,0 32,4	20,2	27,1	•	23,6	•			•	25,4
31	0,7	25,8	19,8	21,8	10,2	33,2	22,2	27,3 27,7	31,7	23,0	27,1		23,6	26,2 26,0		24,6 25,2	25,7 25,9	25,5 25,7
Media	11,7	26,7	18,9	21,7	17,3	34,9	20,3	27,6	33,8	21,2	27,5	29,3	22,8	26,0	27,1	24,5	25,8	25,8

de 6 meses de la estación seca; en la zona de transición (8°N a 4°N) aparecen 2 estaciones secas, ocurriendo la segunda en agosto-octubre, la cual sigue al ir más al sur (Trojer 1966b). Datos de Forsythe (1978) muestran una zona de transición parecida en las planicies costeras de Guyana, donde Wauna (8,18°N) tiene una estación seca en enero-marzo y Georgetown (6,84°N) y Ebini (5,68°N) tienen las 2. Cayenne (5°N) en Guyana

Francesa tiene sola una estación seca de agostooctubre (Critchfield 1974).

En las zonas cerca del ecuador climático (10°N a 5°S) las temperaturas medias mensuales varían poco durante el año (Trojer 1966b). Por ejemplo la media anual ambiental de 21,6°C de Turrialba varía ±1,5°C, mientras que para esa latitud, el valor estimado en la figura 8 es de ±1°C. Si no se dispone del valor de la media ambiental,

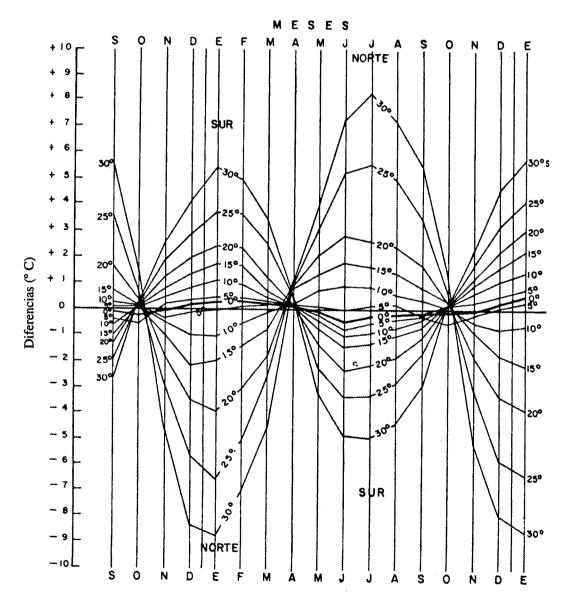


Fig. 8. Diferencias de las medias mensuales de la temperatura de su respectivo promedio anual en el trópico Americano, Trojer (1966a).

este se puede estimar de la figura 9. Se interactúa la fluctuación diaria extrema con la fluctuación estacional extrema y resultan absolutas máximas y mínimas, que en el caso de Turrialba son 33,6°C (la máxima absoluta) y de 15,6°C (mínima absoluta) (Figuras 10 y 11). Las plantas pueden soportar períodos cortos de temperaturas extremas si se sobrepasan sus límites críticos (Troier 1966a). La media anual ambiental de 21,6°C se relaciona con las máximas y mínimas absolutas mencionadas. Dentro de la faja ecuatorial, Trojer (1966a) caracterizó los límites críticos de varios cultivos de zona caliente y de zona fría usando la media anual del lugar donde se observaban los cultivos, siendo que la media anual varía con la altitud de la siembra. Los cultivos en su lista tienen límites críticos dentro de una gama de medias anuales que oscilan entre 5 y 35°C. Por ejemplo, en la figura 12 los límites críticos de caña de azúcar se leen en la escala "media anual" que coinciden con los cabos del rectángulo de dicho cultivo y son 19,4 y 29°C. Cabe anotar que la genética moderna ha producido variedades de los

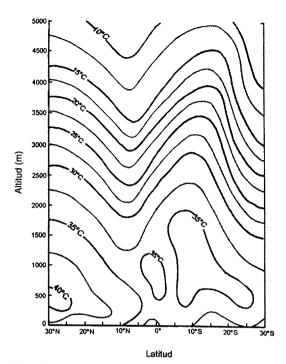


Fig. 10. Niveles isotérmicos en el trópico Americano. Temperaturas máximas absolutas, Trojer (1966a).

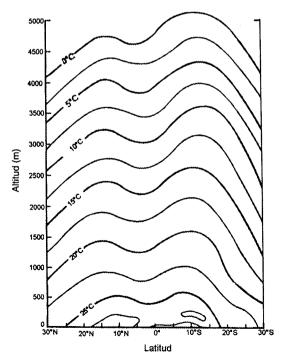


Fig. 9. Niveles isotérmicos en el trópico Americano. Promedios anuales, Trojer (1966a).

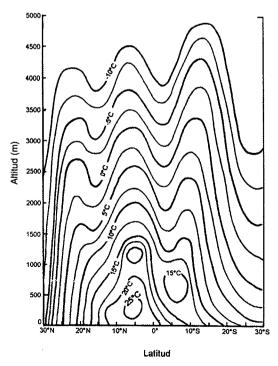


Fig. 11. Niveles isotérmicos en el trópico Americano. Temperaturas mínimas absolutas, Trojer (1966a).

cultivos con límites críticos propios diferentes a los del material estudiado por Trojer (1966a).

Trojer (1966a) elaboró escalas de temperaturas máximas absolutas y de mínimas absolutas que permiten caracterizar los límites críticos absolutos de los cultivos en la faja ecuatorial (Figura 12); sin embargo, se acostumbra usar los límites críticos expresados en medias anuales. Al alejarse de la faja ecuatorial y acercarse a los subtrópicos (20-30° del Ecuador) los cambios estacionales de temperatura aumentan mucho y se caracterizan los límites críticos de los cultivos con las máximas y mínimas absolutas. Por ejemplo, en la figura 12,

los límites críticos de caña de azúcar se leen en las escalas "máxima absoluta" (38,6°C) y "mínima absoluta" (9,3°C) que coinciden con los cabos relevantes del rectángulo de dicho cultivo.

La diferencia $T_{50}^-T_a$ en Turrialba es 3,8°C, lo que permite relacionar $T_{50}^-(23,4^{\circ}C)$ con los límites absolutos ambientales de 21,6+12 y 21,6 -6°C lo cual representa una relación de estado estacionario entre T_{50}^- (anual) y los límites absolutos ambientales. También ocurre una relación con las temperaturas fluctuantes diarias entre 0 y 30 cm en el suelo, y en el caso de Turrialba T_{50}^- (mensual) fluctúa solamente 1,9°C durante un año (Figura 3).

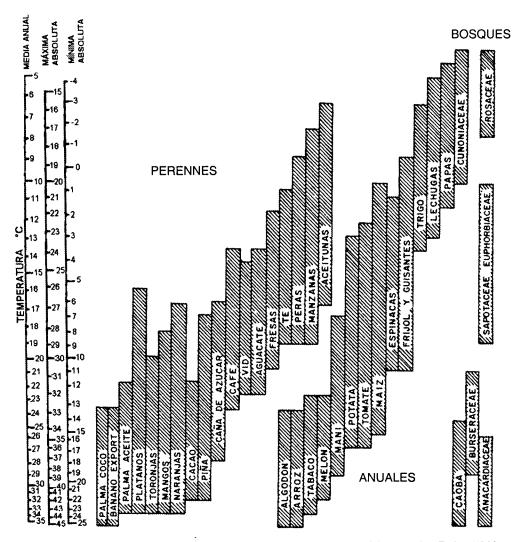


Fig. 12. Condiciones térmicas (promedio y extremas) de algunos cultivos durante su ciclo vegetativo, Trojer (1966a).

Los promedios mensuales (T₅₀) que más se aproximan al promedio anual son el de agosto (100% concordancia) y marzo, julio y noviembre (0.4% menos). Midiendo la T_{50} (mensual) durante dichos meses, se obtiene una buena estimación de T₅₀ anual con una sola medición. Comerma y Sánchez (1982) demostraron que en una calicata recién cavada, esta medición con un termómetro demoró solamente 15 min para equilibrarse con el valor en el suelo. Además, si hay estudios básicos que establecen (T₅₀-T_a) para un país, se puede estimar T_a con base en una sola medición de T₅₀ en lugar de procesar años de datos ambientales. Esto sigue la filosofía de la Taxonomía de los Suelos de usar T₅₀ (estacional) y T₅₀ (anual) para caracterizar la temperatura sobre los suelos. Los estudios en los Estados Unidos establecen que (T₅₀-T_a) es 1°C para la mayor parte del país (Soil Taxonomy 1999), valores diferentes a los de 2,2 a 4°C encontrados en Costa Rica y Venezuela.

Se puede comparar las medias anuales ambientales críticas para café (arábica) en Colombia (Trojer 1966a) de 17,5 y 25,5°C con las medias anuales críticas para Costa Rica de 19 y 24,5°C (Oficina del Café 1975); el rango de Costa Rica es más estrecho y se basa en la calidad del grano. El promedio de R_s para las zonas cafeteras de Turrialba, Alajuela (Estación Experimental Fabio Baudrit), Heredia (Santa Lucía), Nicoya, Hacienda Cachí, Atirro, Agua Caliente, San José, La Luisa, Pavas, Puriscal y Térraba es de 16,8 MJm⁻²día⁻¹±1,48 (DS) (Castro 1987). Si se utiliza la Ecuación 4, esto corresponde a $(T_{50}-T_{a})=3,4^{\circ}C\pm0,57$. Para las zonas cafeteras de Costa Rica se puede decir que los límites de T₅₀ para café son (19+3,4±0,57) y $(24,5+3,4\pm0,57)$ o sea 22,4±0,57 y 27,9±0,57°C. Sería necesario tener los valores de $(T_{50}-T_a)$ para la zona cafetera de Colombia para estimar los T₅₀ para dicho país.

La designación de los T₅₀ (estacionales) como límites de los regímenes térmicos en la Taxonomía de Suelos se basó en límites para cultivos en los Estados Unidos. El límite inferior de clase hipertérmica es de 22°C, considerado como el límite mínimo para el crecimiento de los cítricos; el límite inferior de la clase térmica de 15°C representa el límite inferior para el creci-

miento del algodón; el límite inferior de la clase mésica de 8°C es el límite inferior para el crecimiento de maíz de grano (Buol S. 2000. Comunicación personal).

CONCLUSIONES

Los valores de los regímenes térmicos (T_{50}) de Taxonomía del Suelo se han aplicado a varias partes del mundo para caracterizar un parámetro de suelo importante en su génesis. Sin embargo, para poder relacionar T_{50} con T_a (estacional) harán falta estudios de $(T_{50}-T_a)$ en las zonas de interés, tal como se hizo en el ejemplo de la zona cafetera de Costa Rica.

La información presentada en este trabajo puede servir como guía para analizar los cambios de temperatura del ambiente y el suelo en la zona tropical ecuatorial; asimismo, el compendio matemático presenta una comprensión clara de la teoría sobre la variación de la temperatura del suelo y ambiente en esta región, y su uso en evaluar la evapotranspiración y crecimiento de los cultivos, según la zona ecológica de la región (Trojer 1966a)(Figura 12).

LITERATURA CITADA

- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M. 2000. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage paper. FAO, Rome. 56. 329 p.
- ALVARADO A., GUEVARA J. 1988. Variación de la temperatura del suelo en la Estación Experimental de Chipiriri (1974-1977).
- AMEZQUITA E., LAL R., GREENLAND D.J., PAYNE D. 1993. Diurnal changes in moisture content and isothermal and thermally induced moisture fluxes under n-tillage and c-tillage in Nigeria. Soil and Tillage Research 27:175-194.
- CHANG J.H. 1961. Microclimate of sugar cane. Hawaiian Planters' Record 56:195-225.
- CASTRO V. 1987. Radiación solar global en Costa Rica. MAG-Instituto Meteorológico Nacional. 31 p.
- COMERMA J., SANCHEZ J. 1980. Consideraciones sobre el régimen de temperatura del suelo en Venezuela. IV

- Congreso Agronómico Nacional. VII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. [Resúmenes]. San José, Costa Rica. p. 154-155
- COMERMA J., SANCHEZ J. 1982. Consideraciones sobre el régimen de temperatura del suelo en Venezuela. Agronomía Tropical 32:273-283.
- CRITCHFIELD, H.J. 1974. General climatology. 3Th ed. Prentice-Hall. New Jersey. 446 p.
- DOORENBOS J., PRUITT W. 1990. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudios FAO: riego y drenaje 24. FAO, Roma. 194 p.
- FLUKER B.J. 1958. Soil temperatures. Soil Science 86:35-46.
- FORSYTHE, W.M. 1978. Use of climatic data in agricultural planning and evaluation, and managing soil water resources in Guyana. National grain legume and cassava programme. Simon Bolivar Fund. IICA. Miscellaneous Publications Series. N°200. IICA Office in Guyana. Georgetown. 22 p.
- FORSYTHE W.M. 1999. La relación entre unos parámetros ambientales y la temperatura del suelo en Turrialba, Costa Rica. 14º Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Temuco, Chile. Comisión VI. Suelo y medio ambiente. 4 p.
- HANKS R.J., ASHCROFT G.L. 1980. Applied soil physics. Springer-Verlag. New York. 159 p.
- HANKS R.J., GARDNER H.R., FAIRBOURN M.L. 1967. Evaporation of water from soils as influenced by drying with wind or radiation. Soil Science Society of America Proceedings 31:593-598.
- HARRISON-MURRAY R.S., LAL R. 1979. High soil temperature and the response of maize to mulching in the lowland humid tropics. *In:* Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics. Ed. by R. Lal y D.J. Greenland. John Wiley, p. 285-304.
- HAWS L.D., INDUE H., TANAKA A., YOSHIDA S. 1983. Comparison of crop productivity in the tropics and temperate zone. In: Symposium on Potential Productivity of Field Crops Under Different Environments. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines. p. 403-415.
- KRISHNAN A., KUSHWAHA R.S. 1972. Analysis of soil temperatures in the arid zone of India. Agricultural Meteorology 10:55-64.
- LASCANO R.J. 2000. A general system to measure and calculate daily crop water use. Agronomy Journal 92:821-832.

- MCMICHAEL B.L., BURKE J.J. 1998. Soil temperature and root growth. Hortscience 33:947-951.
- MILLER A., THOMPSON J. 1970. Elements of Meteorology. Charles Merrill Publishing Co., Columbus, Ohio. 402 p.
- MONTIETH J.L. 1958. The heat balance of soil beneath crops. Arid Zone Research 11:123-128.
- MONTIETH J.L. 1979. Soil temperature and crop growth in the tropics. *In:* Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics. Ed. by R. Lal y D.J. Greenland. John Wiley. p. 249-262.
- OFICINA DEL CAFE DE COSTA RICA. 1975. Zonificación cafetalera de Costa Rica. Boletín Técnico Nº1. San José, Costa Rica.
- PRUITT W.O., ANGUS D.E. 1961. Comparisons of evapotranspiration with solar and net radiation and evaporation from water surfaces. *In:* Investigation of energy and mass transfers near the ground including influences of the soil-plant-atmosphere system. First Annual Report, Chapter VI. US Army Electronic Proving Grounds Technical Program-Univ. of California, Davis, California. p. 74-107.
- RAMIREZ P. 1982. Uso de la temperatura en los sistemas de clasificación de suelos. Trabajo domiciliario sin publicar presentado en el curso de Génesis y Clasificación de Suelos, CATIE, Turrialba, Costa Rica. 27 p.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. 2001. Glossary of soil science terms. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin. 138 p.
- SOIL SURVEY STAFF. 1999. Soil Taxonomy. USDA-SCS. Washington. 869 p.
- TREYBAL R.E. 1988. Operaciones de transferencia de masa. 2ª Ed. Mc Graw-Hill. México. 858 p.
- TROJER H. 1966a. Algunas características agroclimatológicas del trópico americano. Reunión Internacional sobre problemas de la agricultura en los trópicos húmedos de América Latina. Lima, Perú, Belem, Brasil. IICA, San José, Costa Rica. 17 p.
- TROJER H. 1966b. The phenological equator for coffee planting in Colombia. First Symposium of Agrometeorology. London. 19 p.
- VAN WIJK W.R., DE VRIES D.A. 1963. Periodic temperature variations in a homogeneous soil. *In:* Physics of plant environment. Ed. by W.R. Van Wijk. North Holland Publ. Co. Amsterdam. p. 102-143.