

Radiação líquida e fluxo de energia à superfície de um Solo Mediterrâneo Pardo (Pmg)

Net radiation and soil heat flux at the interface soil-atmosphere of a Luvisol

J.A. Andrade¹ & F.G. Abreu²

¹*Departamento de Geociências, Universidade de Évora- Colégio Luís António Verney,, Apartado 94, 7002-554 Évora, e-mail: zalex@uevora.pt*

²*Departamento de Ciências do Ambiente, Instituto Superior de Agronomia, Tapada da Ajuda, 1349-017Lisboa, e-mail: fgabreu@isa.utl.pt*

RESUMO

A radiação líquida (R_n) e o fluxo de energia no solo (G) são dois importantes componentes do balanço de energia na interface solo-atmosfera. Medições da radiação líquida (R_n) e do fluxo de energia (G) à superfície de um solo Mediterrâneo Pardo (Luvisolo Háplico) foram analisadas para diferentes dias-tipo, representativos de diferentes níveis de humidade do solo, de insolação astronómica e de nebulosidade.

As variações diárias de R_n e de G são visivelmente harmónicas. As amplitudes diárias de R_n e de G e os valores acumulados de R_n e de G durante o período diurno aumentam com a insolação astronómica e diminuem com o aumento do teor de água no solo e da nebulosidade.

Os valores horários da razão G/R_n variam ao longo do período diurno. G pode atingir mais de 40% de R_n , excepto em solo muito húmido. A razão G/R_n calculada a partir dos valores acumulados de G e de R_n durante o período diurno foi maior em dias longos e de céu limpo (cerca de um terço) e menor em dias em que o teor de água no solo foi superior à capacidade de campo (cerca de 0,2); em dias médios e curtos e em dias de nebulosidade média ou elevada, os valores de G/R_n variaram entre 0,21 e 0,27.

A influência do teor de água no solo, da nebulosidade e da insolação astronómica nas variações de R_n e de G ao longo do dia e na razão G/R_n é discutida.

ABSTRACT

Net radiation and soil heat flux are important components of the soil surface energy balance. Measurements of net radiation (R_n) and soil heat flux (G) at the surface of a Haplic Luvisol were analysed for eight typical days, representatives of different day lengths, levels of sky cloudiness and soil water content.

Daily variations of R_n and G are visibly harmonic. Daily amplitudes of R_n and G and daily accumulated positive values of R_n and G increase with the day length but decrease with the increase in soil water content and sky cloudiness.

Hourly values of G/R_n varied along the diurnal period. G may reach more than 40% of R_n , except in too wet soil. G/R_n ratio calculated from accumulated diurnal values of G and R_n was greater on long and clear days (about 1/3) than on days when the soil water content was above field capacity (about 0,2); G/R_n varied between 0,21 and 0,27 on short and on cloudy days.

The effects of soil water content, length of the day and sky cloudiness both on daily G and R_n variations and on G/R_n ratio are discussed.

INTRODUÇÃO

A radiação líquida (R_n) e o fluxo de energia no solo (G) são dois importantes componentes do balanço de energia na interface solo-atmosfera:

$$R_n = H + LE + G \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (1)$$

onde LE é o fluxo de calor latente resultante dos processos de evaporação/transpiração e H é o fluxo de calor sensível entre a superfície e a atmosfera. O fluxo G determina a variação da temperatura do solo; desta depende, em larga medida, o desenvolvimento do seu perfil (Hillel, 1998) e o crescimento e desenvolvimento das plantas (Monteith, 1977), sobretudo na fase do seu estabelecimento (Mohamed, 1984; Andrade & Abreu, 2002).

Diferentes relações estatísticas entre G e R_n constituem soluções empíricas para o cálculo de G (Idso *et al.*, 1975; De Bruin *et al.*, 1982; Clothier *et al.*, 1986; Oliver *et al.*, 1987; Cellier *et al.*, 1996). Por sua vez, a razão G/R_n tem sido analisada por permitir

simplificar a equação do balanço energético e o cálculo dos respectivos fluxos (Choudhury *et al.*, 1987; Enz *et al.*, 1988; Cellier *et al.*, 1996). A importância relativa do fluxo de energia no solo é pequena se comparada com a dos restantes componentes do balanço energético (Hanks & Jacobs, 1971; De Vries, 1975; Horton & Wierenga, 1983) sendo mesmo ignorado em vários modelos do balanço energético (Hatfield *et al.*, 1984). Contudo, a razão G/R_n pode assumir valores muito diversos consoante o período de tempo utilizado na integração dos valores de G e de R_n ; além disso, diferentes trabalhos demonstram que G/R_n depende de factores como o momento do dia, a cobertura do solo e o estágio de desenvolvimento das culturas (De Bruin *et al.*, 1982; Oliver *et al.*, 1987; Choudhury *et al.*, 1987; Enz *et al.*, 1988), o teor de água no solo (Idso *et al.*, 1975; Clothier *et al.*, 1986), o tipo de solo e as condições meteorológicas (Cellier *et al.*, 1996) e até a profundidade do solo a que o fluxo de energia é medido (Buchan, 1982). Estudos referenciados por Choudhury *et al.* (1987) mostram que os valores diurnos ou horários de G/R_n não ultrapassam 10% em solos cultivados com sorgo, soja, milho ou cana do açúcar. Contudo, em termos horários o fluxo de energia num solo nu pode representar cerca de 50% da energia disponível na interface solo-atmosfera (Idso *et al.*, 1975, Oliver *et al.*, 1987), sobretudo em regiões áridas e semi-áridas (Massman, 1992).

Neste trabalho analisa-se a variação horária de R_n , G e G/R_n num Solo Mediterrâneo Pardo (Pmg), ao longo de diferentes dias-tipo, assim como a proporção da radiação líquida que, em cada período diurno, é usada para aquecer o solo. Os dias-tipo analisados são representativos de diferentes níveis de humidade do solo, de insolação astronómica e de nebulosidade. Durante as experiências o solo não apresentou qualquer tipo de cobertura.

MATERIAL E MÉTODOS

As experiências decorreram numa parcela de terreno do Monte dos Álamos, Évora (Lat.: 38°30'N; Long.: 7°45'W), sem cobertura vegetal, situada 210 metros acima do nível médio do mar, entre Junho de 1995 e Novembro de 1996. A região possui um clima mediterrâneo do tipo *Csa* segundo a classificação climática de Köppen

(mesotérmico húmido de verões quentes e secos). O período seco num ano médio estende-se de Junho a Setembro.

O solo é classificado como um Solo Mediterrâneo Pardo Normal (Classificação Portuguesa do CNROA) de perfil Ap1 (0-20 cm) – Ap2 (20-36 cm) – BC (36-64 cm). A textura é franco-arenosa, o teor em matéria orgânica é de cerca de 1% e a massa volúmica aparente varia entre 1,48 Mg m⁻³ no horizonte superficial (Ap1) e 1,67 Mg m⁻³ no horizonte subsuperficial (Ap2). Os teores volúnicos de água equivalentes a 33 kPa de sucção variaram entre 0,23 cm³ cm⁻³ (Ap1) e 0,50 cm³ cm⁻³ (BC); os correspondentes teores para 1,5 MPa de sucção variaram entre 0,10 cm³ cm⁻³ (Ap1) e 0,28 cm³ cm⁻³ (BC).

O fluxo de energia no solo (G) foi medido por três placas de fluxo de calor (HFT-1 da REBS, Inc.), colocadas a 1 cm de profundidade (Idso *et al.*, 1975; Oliver *et al.*, 1987; Enz *et al.*, 1988), e a radiação líquida (R_n) por um pirradiómetro (Q7 Net Radiometer da Campbell Scientific, Inc.) colocado a 1,25 metros acima da superfície do solo (Enz *et al.*, 1988). Estes instrumentos foram ligados a um acumulador automático de dados (CR 10 da Campbell Scientific, Inc.). Foram registados valores médios horários de G e de R_n. Os valores de G foram as médias aritméticas dos valores medidos pelas três placas utilizadas. O teor de humidade do solo (θ) nos 10 cm superficiais foi medido de 2 em 2 dias pelo método gravimétrico,.

Foram analisadas as variações diárias de G e de R_n para diferentes dias-tipo representativos de três níveis de insolação astronómica (dia curto, C – próximo do solstício de Dezembro; médio, M – próximo dos equinócios; longo, L - próximo do solstício de Junho) e de três níveis de humidade do solo em dias do tipo M (dia M-Hb, $\theta < 50\%$ de Cap. Utilizável; M-Hm, 50% de Cap. Utilizável $< \theta < \text{Cap. Campo}$; M-He, $\theta > \text{Cap. de Campo}$). A nebulosidade foi média (cerca de 4/8) em cinco destes dias e elevada (6/8) no dia M-He. Foram ainda definidos três dias-tipo representativos de outros tantos níveis de nebulosidade medidos entre o nascer e o pôr do Sol: dia I, céu limpo; N, céu parcialmente nublado; E, céu encoberto. Em qualquer destes dias o teor de água no solo foi intermédio e a insolação astronómica foi de aproximadamente 12 horas. O Quadro 1 apresenta os parâmetros meteorológicos (temperaturas do ar e do solo a 2 cm de profundidade, precipitação acumulada, nebulosidade média e velocidade

média do vento) e os teores médios de humidade do solo relativos aos oito dias-tipo analisados.

QUADRO 1 – Parâmetros meteorológicos e teor médio de água nos 10 cm superficiais do solo nos dias-tipo estudados (C-Hm, M-Hb, M-Hm, M-He, L-Hm, I, N e E)

	Dias-tipo							
	C-Hm	M-Hb	M-Hm	M-He	L-Hm	I	N	E
Temperatura do ar (°C)								
(máxima)	17,3	27,7	19,2	13,5	32,3	24,6	22,1	20
(média)	11,9	18,7	11,3	8,7	23	15,6	14,3	14,9
Temperatura média do solo (°C)								
(diária)	12,7	23,4	15,4	11,3	24,4	19,2	16,3	17,6
(diurna)	16,4	28,0	19,9	14,0	25,9	24,0	19,8	20,1
(nocturna)	10,5	19,4	11,5	9,0	22,6	15,1	13,3	15,1
Precipitação total (mm)	10	0	1	3,8	0	0	0	0
Nebulosidade média (oitavos)	4	4	4	6	4	1	4	8
Teor de água no solo (cm ³ cm ⁻³)	0,18	0,09	0,19	0,26	0,19	0,19	0,21	0,2
Velocidade média do vento (m s ⁻¹)	2,5	2,5	2,3	2,7	2,6	2,6	2,5	3,8

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Variação diária de R_n e de G

A Figura 1 mostra as variações da radiação líquida (R_n) e do fluxo de energia no solo (G) ao longo dos dias-tipo C, L, M-Hb, M-Hm, M-He, I, N e E. Em qualquer caso, as variações diárias de R_n e de G são visivelmente harmónicas. De noite os valores de R_n e de G foram sempre negativos, mas entre o nascer e o pôr do Sol os valores de R_n e de G assumiram, de uma forma geral, valores positivos. Durante o período nocturno as amplitudes de R_n e de G foram consideravelmente menores que as observadas durante o período diurno, devido à ausência de radiação solar, enquanto que os valores de R_n foram, em valor absoluto, geralmente menores que os de G , indicando que houve perda líquida convectiva de energia da superfície do solo para a atmosfera ($H+LE > 0$). Os valores negativos de R_n durante o período nocturno indicam um predomínio da radiação terrestre sobre a radiação atmosférica em qualquer dos dias-tipo analisados, decorrente das diferentes emissividades da atmosfera e da superfície terrestre e das diferenças entre as temperaturas da camada superficial do solo e do ar (Quadro 1).

Para cada dia-tipo, o Quadro 2 apresenta o número de horas em que G e R_n foram positivos, os valores máximos e mínimos horários de G e de R_n e as horas do dia em que

ocorreram, assim como os valores acumulados referentes ao período do dia em que R_n [$R_n(+)$ acum]) e G [$G(+)$ acum] foram positivos. Os valores de G foram positivos durante menos horas (de uma forma geral, menos 2-3 horas) que os de R_n . Os valores máximos de G ocorreram durante a mesma hora ou uma hora antes que os de R_n enquanto que os mínimos de G ocorreram à mesma hora que os de R_n nos dias C, M-Hb, M-Hm e L, uma a duas horas antes nos dias I e E ou em fases diferentes do ciclo diário nos dias L e N. Para qualquer dos oito dias-tipo as diferenças observadas entre os valores máximos horários de R_n e de G foram sempre maiores que as verificadas entre os respectivos mínimos horários, porque a gama de valores assumidos pela radiação solar global ao longo de um ciclo diário é geralmente maior que a dos valores da radiação efectiva (perda de radiação de grande comprimento de onda).

Quadro 2 – Valores máximos e mínimos e valores acumulados durante o período diurno da radiação líquida (R_n) e do fluxo de energia no solo (G), e respectiva razão G/R_n em vários dias-tipo.

	Dias-tipo							
	C	M - Hb	M - Hm	M - He	L	I	N	E
G e R_n positivos								
$G (+)$ (nº total de horas)	6	9	9	8	10	9	9	9
$R_n (+)$	9	11	11	11	13	11	11	12
Radiação líquida (R_n)								
Máximo ($W m^{-2}$)	304,7	511,0	517,8	363,2	626,0	597,8	555,6	374,3
Ocorrência (hora)	13	12	13	13	13	14	13	12
Mínimo ($W m^{-2}$)	-34,1	-45,3	-54,3	-38,3	-69,6	-54,3	-59,6	-23,1
Ocorrência (hora)	19	20	20	20	21	21	24	21
$R_n(+)$ Acum ($MJ m^{-2} dia^{-1}$)	5,84	12,7	12,1	8,77	17,1	14,1	12,9	8,75
Fluxo de energia no solo (G)								
Máximo ($W m^{-2}$)	95,0	156,8	141,4	71,1	244,9	232,9	136,0	120,0
Ocorrência (hora)	12	12	13	12	13	13	12	11
Mínimo ($W m^{-2}$)	-56,7	-65,2	-62,8	-39,1	-86,7	-60,0	-39,9	-40,0
Ocorrência (hora)	19	20	20	6	21	20	1	19
$G(+)$ Acum ($MJ m^{-2} dia^{-1}$)	1,48	3,26	2,88	1,18	5,56	4,68	2,75	2,38
G/R_n (período diurno)								
Máximo	0,34	0,31	0,31	0,20	0,40	0,44	0,32	0,33
Ocorrência (hora)	11	12	11	12	12	11	11	11
Acumulado	0,25	0,26	0,24	0,13	0,33	0,33	0,21	0,27

a) Insolação astronómica

As amplitudes diárias de R_n e de G foram maiores no dia L ($\Delta G = 331,6 W m^{-2}$; $\Delta R_n = 695,6 W m^{-2}$) e menores no dia C ($\Delta G = 152 W m^{-2}$; $\Delta R_n = 338,8 W m^{-2}$). Para estes resultados contribuíram, em simultâneo, o aumento dos valores máximos horários de R_n e de G com a insolação astronómica e a diminuição dos respectivos mínimos

horários entre o Inverno e o Verão (Quadro 2). O aumento dos valores máximos, devido sobretudo ao aumento da radiação solar global, foi visivelmente maior que a diminuição dos respectivos valores mínimos.

Os valores de $R_n(+)$ _{acum} e $G(+)$ _{acum} aumentaram com a insolação astronómica. No dia L, $R_n(+)$ _{acum} e $G(+)$ _{acum} foram cerca de três vezes superiores aos do dia C enquanto que no dia médio os valores correspondentes foram intermédios entre os dias longo e curto (Quadro 2). Num solo de textura média, nu e sob céu limpo, Oliver *et al.* (1987) obtiveram para um dia do mês de Maio em Tel Hayda, na Síria, valores de $R_n(+)$ _{acum} da ordem de $15,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ enquanto que $G(+)$ _{acum} atingiu $2,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, sendo o de $R_n(+)$ _{acum} superior e o de $G(+)$ _{acum} inferior aos respectivos valores obtidos neste trabalho no dia-tipo mais próximo do equinócio (M-Hm).

b) Nebulosidade

As amplitudes diárias de R_n e de G diminuíram com o aumento da nebulosidade, o que é consistente com a sua redução à medida que a insolação astronómica diminuiu. No dia E, as amplitudes diárias de R_n representam cerca de dois terços das verificadas nos dias I e N ($\Delta R_n = 652 \text{ W m}^{-2}$ e $\Delta R_n = 615,2 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente). Pelo contrário, as amplitudes diárias de G foram iguais a $292,9 \text{ W m}^{-2}$ no dia I e cerca de $160\text{-}180 \text{ W m}^{-2}$ nos dias N e E. (Quadro 2). Os valores máximos de R_n observados nos dias I e N são consideravelmente maiores que o máximo registado no dia E devido à diminuição da radiação solar global incidente à superfície, sob céu nublado, enquanto que a radiação efectiva atingiu valores absolutos mais elevados nos dias I e N relativamente ao dia E, devido ao aumento da radiação atmosférica decorrente da maior nebulosidade verificada neste dia. Em consequência, o valor máximo horário de G obtido no dia I quase duplicou os obtidos nos dias N e E enquanto que os respectivos valores mínimos aumentaram com a nebulosidade em cerca de dois terços (equivalente a 20 W m^{-2}).

Os valores de $R_n(+)$ _{acum} e $G(+)$ _{acum} diminuíram com o aumento da nebulosidade: $R_n(+)$ _{acum} variou entre $14,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (dia I) e $8,75 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (dia E) enquanto que $G(+)$ _{acum} variou entre $4,68 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (dia I) e $2,38 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (dia E). Também outros autores mediram reduções de $R_n(+)$ _{acum} e $G(+)$ _{acum} com o aumento da nebulosidade. Num solo de textura média no Estado de Dakota do Norte, Enz *et al.*, (1988) obtiveram, para diferentes dias do mês de Maio, diferenças maiores entre os

valores de $R_n(+)$ relativos a dias de céu limpo ($16,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e de céu encoberto ($6,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), encontrando-se neste último dia o solo completamente encharcado. Num solo nu, em Wallingford (Reino Unido), Oliver *et al.* (1987) obtiveram para $G(+)$ _{acum} valores de $3,05 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ sob céu limpo e de $1,41 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ sob céu encoberto, ambos em dias de primavera (28 de Abril e 12 de Junho, respectivamente).

c) Teor de água no solo

As amplitudes diárias de R_n e de G foram maiores nos dias com humidade do solo baixa a média ($\Delta R_n = 565 \text{ W m}^{-2}$; $\Delta G = 215 \text{ W m}^{-2}$) que no dia M-He ($\Delta G = 110 \text{ W m}^{-2}$; $\Delta R_n = 401 \text{ W m}^{-2}$). Estas diferenças foram devidas sobretudo aos maiores valores máximos horários de R_n e de G registados nos dias M-Hb e M-Hm, relativamente aos do dia em que a humidade do solo foi a mais elevada, pois a contribuição dos valores mínimos de G e de R_n para tais diferenças é pequena (Quadro 2).

Os valores acumulados de R_n durante o período diurno [$R_n(+)$ _{acum}] foram semelhantes nos dias em que o teor de água no solo foi baixo ou médio ($12-13 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) mas diminuíram quando o solo se apresentou muito húmido ($8,77 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). O coeficiente de reflexão da superfície de um solo diminui com o aumento do teor de água do solo pelo que seria de esperar um aumento de R_n com o teor de humidade do solo. O valor de R_n obtido no dia M-He dever-se-á provavelmente à maior nebulosidade medida naquele dia (Quadro 1). Os valores acumulados de G durante o período do dia em que apresentou valores positivos [$G(+)$ _{acum}] diminuíram com o aumento do teor de humidade do solo (variaram entre $3,26 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ no dia M-Hb e $1,18 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ no dia M-He).

Razão G/R_n

a) Valores horários

A Figura 2 apresenta variações horárias de G/R_n nos diferentes dias-tipo, durante o período do dia em que a razão assume valores positivos (correspondente ao período em que G é positivo). O tipo de variação de G/R_n é semelhante nos diferentes dias, i.e., é independente do estado hídrico do solo, da insolação astronómica e da nebulosidade: os valores máximos de G/R_n ocorreram às 11-12 horas e foram, de uma forma geral, anteriores aos máximos medidos de R_n e de G (Quadro 2); o aumento de G/R_n no

período da manhã parece ser mais rápido que o decréscimo verificado no período da tarde. Este último aspecto deve-se ao facto de o crescimento de G durante o período da manhã, até G máximo, ser mais rápido que o seu decréscimo durante a tarde, enquanto que a variação de R_n durante o período diurno é mais harmónica que a de G (Fig. 2). Esta assimetria é visível em correlações lineares estabelecidas entre os valores diurnos de G e R_n (Idso *et al.*, 1975, De Bruin & Holtslag, 1982; Choudhury *et al.*, 1987), contribuindo, provavelmente, para uma menor qualidade dessas correlações.

Na Figura 2 é visível a influência da insolação astronómica, do teor de água no solo e da nebulosidade nos valores horários de G/R_n : dias longos aumentaram estes valores relativamente a dias mais curtos (Figura 2a), a nebulosidade elevada reduziu-os relativamente a dias de céu limpo (Figura 2b) e teores de humidade do solo elevados

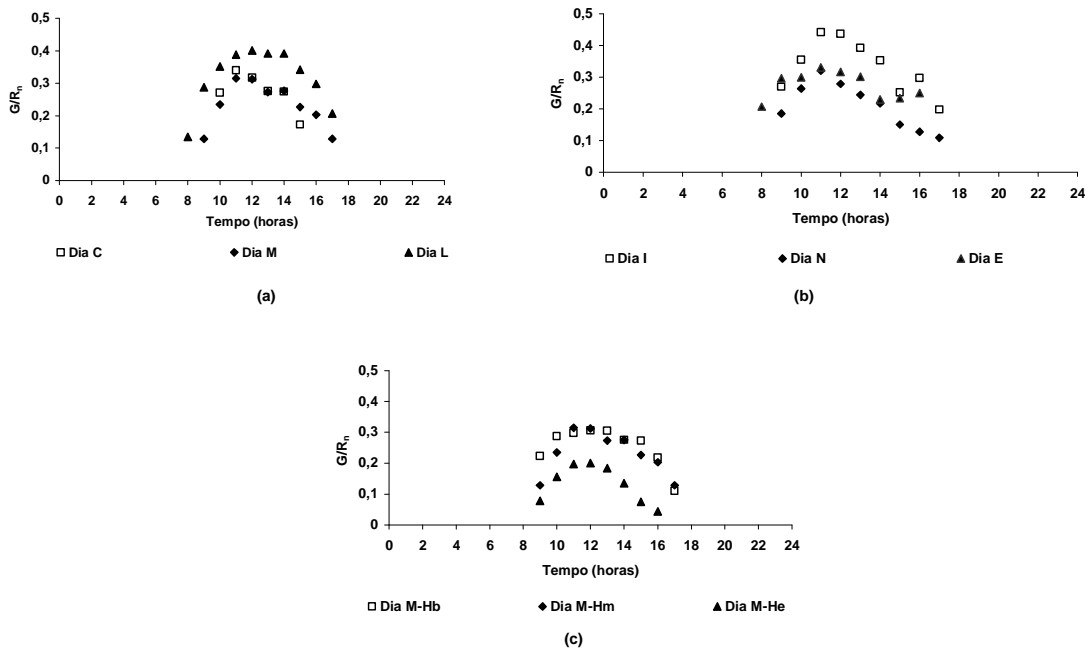


Figura 2 – Razão G/R_n diurno em função (a) da insolação astronómica, (b) da nebulosidade e (c) do teor de água no solo.

reduziram-nos relativamente a solo mais seco (Figura 2c). Os valores máximos horários de G/R_n atingiram 0,40 e 0,44, respectivamente nos dias L e I, mas não ultrapassaram 0,21 durante o dia M-He. Nos restantes dias (C, M, N e E), G representou, no máximo, cerca de um terço de R_n (Quadro 2). Num solo de textura média e coberto por vegetação esparsa (com cerca de 10 cm de altura), Clothier *et al.* (1986) apresentaram valores máximos horários de G/R_n da mesma ordem de grandeza dos obtidos neste trabalho,

mas pouco variáveis se analisados em função do teor de humidade do solo (entre 0,23 e 0,31 em solo seco e entre 0,20 e 0,30 em solo muito húmido). Contudo, estes autores compararam dias com insolações astronómicas consideravelmente diferentes, além de que a nebulosidade foi, em geral, elevada.

b) *Valores diurnos acumulados*

A razão G/R_n calculada a partir dos valores acumulados de G e de R_n durante o período diurno foi maior no dia L (igual a 0,33) relativamente aos dias M e C (cerca de um quarto), foi maior no dia em que o céu se encontrou limpo (igual a 0,33) relativamente aos dias N e E (cerca de um quarto) e diminuiu com o aumento do teor de água no solo, variando entre 0,26 no dia M-Hb e 0,13 no dia M-He (Quadro 2). No dia M-He, os valores obtidos por G/R_n foram perturbados pela influência da nebulosidade, que afecta tanto G como R_n .

Em solos com características semelhantes ao que foi usado neste trabalho (textura média e ausência de cobertura vegetal), Oliver *et al.* (1987) obtiveram, sob céu limpo, valores de G/R_n consideravelmente mais baixos (0,18 em Tel Hayda, Síria, e 0,05-0,07 em Wallingford, Reino Unido) que os apresentados neste trabalho, mas não referiram os teores de humidade do solo correspondentes a cada um dos ciclos diários analisados. Por outro lado, Enz *et al.* (1988) obtiveram valores de G/R_n que variaram entre 8,2% (céu limpo, teor de humidade do solo médio) e 20,6% (céu pouco nublado, teor elevado de humidade do solo) e que foram de 11,5% em condições de céu encoberto, sendo que o valor referente ao dia de céu limpo ter-se-á devido, provavelmente, à elevada velocidade média do vento registada ($8,6 \text{ m s}^{-1}$), responsável pelo incremento da evaporação e correspondente redução de G .

Os valores de G/R_n obtidos para diferentes níveis de humidade do solo (Quadro 2) são compatíveis com os valores referidos na bibliografia. Cellier *et al.* (1996) em Lain, França, obtiveram durante a Primavera de 1991, e para condições atmosféricas diversas, valores entre 20% e 50% para a razão G/R_n calculada a partir dos valores médios de G e de R_n no período diurno, enquanto o teor de água variou entre $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (0,01 MPa) e $0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (1,5 MPa). Num solo nu e de textura média, em Phoenix, EUA, Idso *et al.* (1975) obtiveram valores de G/R_n (valores médios diários) iguais a 0,30 e a 0,50, respectivamente em solo muito húmido e em solo seco. Ao invés, os resultados obtidos parecem contrariar os apresentados por Fuchs & Hadas (1972), em solo nu e de textura

média, onde G/R_n (valores médios diários) atingiu, em dias de Verão, cerca de 30% quando o solo apresentou seco (teores de humidade inferiores a $0,05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) ou muito húmido (teores entre $0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

De uma forma geral, os trabalhos citados analisaram a variação de G/R_n em função de um dado factor (nebulosidade ou humidade do solo), sem que tenha havido controle experimental ou quantificação dos restantes (nebulosidade, humidade do solo ou insolação astronómica). Isto explica, provavelmente, parte das diferenças encontradas entre os valores de G/R_n (horários e diurnos) obtidos neste trabalho e nos citados.

Considerando que a variação de G/R_n em função da insolação astronómica, da nebulosidade e da humidade do solo é semelhante à observada individualmente para R_n $(+)_{\text{acum}}$ e $G(+)_{\text{acum}}$, G é proporcionalmente mais afectado por estes factores do que R_n . Como consequência, a proporção de R_n disponível para ser repartida pelos restantes termos do balanço energético também é afectada por estes factores. Por exemplo, entre os dias em que a humidade do solo foi média (dias C, L, M-Hm, I, N, E), 33% de R_n diurno acumulado nos dias L e I foi utilizado no aquecimento do solo tendo os restantes dois terços sido repartidos entre o aquecimento do ar e a evaporação da água do solo, enquanto que nos restantes dias estes valores foram, respectivamente, de cerca de 25% e 75%.

CONCLUSÕES

As variações diárias de R_n e de G são visivelmente harmónicas. As amplitudes diárias de G e de R_n e os valores acumulados de G e de R_n durante o período diurno diminuem com o aumento do teor de água no solo e da nebulosidade e aumentam com a insolação astronómica. Em termos horários, G pode representar mais de 40% de R_n em dias de Verão ou de céu limpo. Nestes dias, cerca de um terço da radiação líquida acumulada durante o período diurno é utilizada para aquecer o solo. Estas proporções são menores em dias mais curtos e de maior nebulosidade, e sobretudo em solo muito húmido onde menos de 15% da radiação líquida é utilizada no aquecimento do solo durante o período diurno. A influência destes factores parece ser proporcionalmente maior em G que em R_n , de tal forma que a razão G/R_n também é afectada no mesmo

sentido, afectando por isso a proporção de R_n que é repartida para aquecimento do ar e evaporação de água do solo.

Os resultados obtidos neste trabalho mostram a importância da especificação das condições ambientais em estudos que consideram a proporção de energia utilizada no aquecimento do solo. A influência do teor de água no solo nesta proporção assume papel de relevo nas condições semi-áridas mediterrâneas, onde as taxas de evaporação são elevadas mesmo no Inverno.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao PROJECTO *CICLUS*, PROGRAMA *PRAXIS XXI* (FCT) e ao CENTRO DE PEDOLOGIA (FCT) o apoio financeiro à realização deste trabalho

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, J. e Abreu, F.G. 2002. Desenvolvimento inicial da fava (*Vicia faba* L.) e do milho (*Zea mays* L.) em dois tipos de solos, a diferentes temperaturas e teores de Humidade. *Revista das Ciências Agrárias*, vol. **XXV** (n^{os} **3 e 4**):413 – 425.
- Buchan, G.D.. 1982. Predicting bare soil temperature. I. Theory and model for the multi-day mean diurnal variation, *Journal of Soil Science*, **33**: 185-197.
- Cellier, P., Richard, G. & Robin, P. 1996. Partition of sensible heat fluxes into bare soil and the atmosphere. *Agric. and For. Meteorology*, **82**: 245-265.
- Choudhury, B.J., Idso, S.B. & Reginato, R.J. 1987. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation. *Agric. and For. Meteorology*, **39**: 283-297.
- Clothier, B.E., Clawson, K.L., Pinter, Jr, P.J., Moran, M.S., Reginato, R.J. & Jackson, R.D. 1986. Estimation of soil heat flux from net radiation during the growth of alfafa. *Agric. and For. Meteorology*, **37**: 319-329.

- De Bruin, H.R. & Holtslag, A. 1982. A Simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime compared with the Penman-Monteith Concept. *Journal of Applied Meteorology*, **21**: 1610-1621.
- De Vries, D.A. 1975. Heat transfer in soils. In D.A. de Vries & N.H. Afgan (eds) *Heat and Mass Transfer in the Biosphere*, pp. 5-28. Scripta Book Company, New York.
- Enz, J.W., Brun, L.J. & Larsen, J.K. 1988. Evaporation and energy balance for bare and stubble covered soil. *Agric. and For. Meteorology*, **43**: 59-70.
- Fuchs, M. & Hadas, A. 1972. The heat flux density in a non-homogeneous bare loessial soil. *Boundary-Layer Meteorology*, **3**:191-200.
- Hanks, R.J. & Jacobs, H. S. 1971. Comparison of the calorimetric and flux meter measurements of soil heat flow. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **35**: 671-675.
- Hatfield, J.L., Reginato, R.J. & Idso, S.B. 1984. Evaluation of canopy temperature-evapotranspiration models over various crops. *Agric. and For. Meteorology*, **32**: 41-53.
- Hillel, D.. 1998. *Environmental Soil Physics*, Academic Press, San Diego.
- Horton, R. & Wierenga, P.J. 1983. Estimating the soil heat flux observations of soil temperatures near the surface. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, **47**: 14-20.
- Idso, S.B., Aase, J.K. & Jackson, R.D. 1975. Net radiation-soil heat flux relation as influenced by soil water content variations. *Boundary Layer Meteorology*, **9**: 113-122.
- Massman, W.J. 1992. Correcting errors associated with soil heat flux measurements and estimating soil thermal properties from soil temperature and heat flux plate data. *Agric. and For. Meteorology*, **59**: 249-266.
- Mohamed, H.A. 1984. *Varietal Differences in the Temperature Responses of Germination and Crop Establishment*. Ph.D.Thesis, Nottingham University, Nottingham.
- Monteith, J.L.. 1977. Climate. In: P.T. Alvin & T.T. Kozlowsky (eds) *Ecophysiology of Tropical Crops*, pp. 1-25. Academic Press, New York.
- Oliver, S.A., Oliver, H.R., Wallace J.S. & Roberts, A.M. 1987. Soil heat flux and temperature variation with vegetation, soil type and climate. *Agric. and For. Meteorology*, **39**:257-269.

