

CARACTERÍSTICAS PSICROMÉTRICAS DO AR NO INTERIOR DE PLANTAÇÕES DE CACAU CULTIVADOS À SOMBRA E AO SOL

Hermes Alves de Almeida¹, Regina Cele Rebouças Machado²

¹ Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, Brasil. hermes_almeida@uol.com.br; ² Almirante Cacau Agrícola, Rod. BR 101 S/nº, 45625-000, Barro Preto, Bahia, Brasil

A psicrometria estuda as propriedades termodinâmicas do ar que governam as trocas de energia entre a atmosfera e a superfície, seja ela vegetada ou não. Este trabalho teve por objetivo principal estabelecer as principais características das variáveis psicrométricas do ar no interior de cacauais cultivados à sombra e ao sol na área experimental do Centro de Pesquisas do Cacau (Cepec), Ilhéus, Bahia (14°45'S e 39°40'W). Utilizando-se uma série de dados horários de temperatura do ar (t_a) e umidade relativa do ar (UR), de um período de sete anos, foram determinadas as pressões parcial (e_a) e de saturação de vapor (e_s), o déficit de saturação (DPV) e a temperatura do ponto de orvalho (t_o). Os resultados mostraram que durante o período matutino, a temperatura do ar nos cacauais ao sol foi, em média, 2,7 °C maior que nos à sombra e de 3,7 °C, quando se compara o inverno com o verão. As oscilações diárias da umidade relativa do ar nos cacauais à sombra foram sempre menores que naqueles ao sol e a saturação do ar perdura por 2 horas a mais no inverno que no verão. As pressões parcial e máxima de saturação de vapor d'água, dos cacauais ao sol, em relação aos à sombra, tendem a ser menores ou iguais entre o ocaso e nascer do sol e maiores, durante o período diurno. As concordâncias encontradas nos modelos de estimativas da temperatura do ar e umidade relativa, para cacauais ao sol, demonstram precisões nas suas estimativas a partir dos respectivos valores medidos à sombra.

Palavras-chave: cacauais, temperatura do ar, umidade relativa do ar.

Characteristics psychometrics of the air within cocoa plantations grown in the shadow and sun. The psychometrics studies the thermodynamic properties of air that govern the exchange of energy between the atmosphere and surface, whether vegetated or not. This work had for main objective to establish the principal characteristics of the variables psychometrics of air inside the cocoa plantation grown in the shade and sun in the experimental area of the Cocoa Research Center (Cepec), Ilheus, Bahia (14°45'S and 39°40'W). Hourly data of air temperature and humidity (HR) were collected, inside both plantations, at 1.5 m above the soil and for seven years, being estimated the partial pressures (e_a) and vapor saturation (e_s), the saturation deficit (VPD), temperature of the dew point (t_o). The results showed that, in the morning, the air temperature in the cocoa in the sun was on average 2.7 °C higher than in the shade and 3.7 °C, when comparing the winter through the summer. The daily variations of relative humidity in the shade cocoa plantations were consistently lower than in the sun and air saturation lasts for 2 hours more in winter than in summer. The partial pressures and maximum saturation of water vapor, of cocoa in the sun for the shade, they tend to be smaller or equal to chance and sunrise and higher in the period daytime. As excellent concordance found in models estimates of air temperature and humidity for cocoa in the sun, show the high precision in their estimates from the respective values measured in the shade.

Key words: cocoa tree, air temperature, relative humidity.

Introdução

A psicrometria é o estudo das misturas de ar e vapor d'água, cujas pesquisas são, normalmente, feitas utilizando-se psicrômetros que é um instrumento constituído, basicamente, por um conjunto de termômetros de bulbo seco e úmido (coberto por um tecido imerso em água). À medida que passa uma corrente de ar, a água se evapora do tecido, até atingir uma temperatura de equilíbrio, chamada temperatura do bulbo úmido (tu).

Dados meteorológicos do ambiente podem ser apresentados por diferentes maneiras, em termos de variações da quantidade de vapor d'água na atmosfera, na escala vertical e temporal, e normalmente são obtidos por diferentes instrumentos (Jupp, 2003). No entanto, o conhecimento de propriedades psicrométricas é fundamental para projetar sistemas de controle ambiental para plantas, animais e seres humanos (Singh et al., 2002).

As propriedades termodinâmicas do ar governam as trocas de energia entre a atmosfera e a superfície, seja ela vegetada ou não. O cacauzeiro é cultivado sob a proteção de árvores de sombra, o que propicia um microclima, em princípio, mais adequado à cultura. Essas árvores resguardam os cacauzeiros reduzindo a incidência direta da irradiância solar de ondas curtas e o resfriamento decorrente da perda de irradiância noturna (ondas longas) aprisionadas pelas suas copas.

A maioria dos trabalhos relaciona o efeito isolado da chuva, temperatura do ar, umidade relativa ou de outro elemento do clima nos diferentes estágios fisiológicos do cacauzeiro usando apenas médias mensais de dados de estações meteorológicas, que são instaladas em locais padronizados, ou seja, fora das plantações. Por isso, dados dessa natureza e/ou usando-se médias aritméticas, em essência, só elucidam parcialmente, porque o ecossistema do cultivo do cacauzeiro forma um microclima (Almeida, 1997; Almeida e Machado, 2008).

Destaca-se, ainda, que a temperatura do ar (tar), a umidade relativa (UR) e os dados derivados de tar e UR são os elementos que mais interferem na fenologia do cacauzeiro (Almeida, 1997). Por isso, caracterizar as propriedades termodinâmicas do ar torna-se fundamental não somente nos estudos ecológicos da cultura, mas dos microorganismos que causam surtos epidêmicos (Oliveira e Luz, 2005).

Diante disto, houve a necessidade de se estabelecer as principais características psicrométricas do ar úmido no interior de plantações de cacau cultivados à sombra e ao sol, no Centro de Pesquisas do Cacau (Cepec), Ilhéus, Bahia, sendo essas determinações os objetivos principais deste trabalho.

Materiais e Métodos

O experimento foi conduzido na área experimental de cacau (*Theobroma cacao* L), localizada na Quadra E, do Centro de Pesquisas do Cacau (CEPEC), Ilhéus, Bahia, latitude 14°45'S e longitude 39°40'W. Em uma das parcelas experimental, com cacauzeiros adultos plantados no espaçamento de 3 x 3 m, sob sombreamento de Eritrina (*Erythrina glauca* willd), no espaçamento de 24 x 24m, sistema esse chamada de cacauzeiro à sombra. Numa parcela contígua, foi retirado a árvores de sombra, sendo denominada de cacauzeiro ao sol.

No centro de cada uma dessas áreas foi instalado um abrigo meteorológico padronizado, a 1,5 m da superfície do solo, contendo um termohigrógrafo e um psicrômetro. A partir dos registros contínuos horários de temperatura do ar (tar) e umidade relativa (UR), de uma série de sete anos, foram determinados a pressão de saturação de vapor (e_s), utilizando-se da aproximação e derivações de Tetens (1930), pressão parcial de vapor (e_a), déficit de pressão de saturação (DPV) e temperatura do ponto de orvalho (t_o) utilizando-se as equações 1, 2, 3 e 4:

$$e_s (kPa) = 0,61 \times 10 \left[\frac{7,5 \times tar}{237,3 + tar} \right] \quad (1)$$

$$e_a (kPa) = (e_s \times UR) \times 0,01 \quad (2)$$

$$DPV (kPa) = (e_s - e_a) \quad (3)$$

$$t_o (^\circ C) = \frac{237,3 \times \log(e_a / 0,61)}{7,5 - \log(e_a / 0,61)} \quad (4)$$

As variáveis térmicas e psicrométricas, horárias, diárias, mensais e das quatro estações do ano, foram analisadas para as duas condições: à sombra (SB) e ao sol (SL), destacando-se as análises para os períodos correspondentes ao inverno (inv) e ao verão (ver).

O modelo de regressão, entre a temperatura do ar e umidade relativa, na condição de cacau ao sol, e os seus respectivos pares para a condição à sombra, foi estabelecido mediante a equação de regressão linear do tipo $Y = a + bX$, sendo $Y = \text{tar}$ e UR ao sol e $X = \text{tar}$ e UR à sombra.

A escolha do melhor modelo foi feita com base nos índices estatísticos de precisão (coeficiente de determinação- r^2), de concordância (d), proposto por Willmott et al (1985), e de confiança ou desempenho (6), estabelecido por Camargo e Sentelhas (1997), mediante as equações descritas a seguir:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum \left(|P_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i| \right)^2} \right] \quad (5)$$

$$c = d \sqrt{r^2} \quad (6)$$

Sendo O_i e P_i os dados observados e estimados de temperatura do ar e/ou de umidade relativa utilizando-se as respectivas equações de regressão estabelecida. A barra do sobrescrito significa a média dos valores estimados pelos métodos.

Os cálculos, análises estatística e de regressão e a confecção dos gráficos, foram elaborados utilizando-se a planilha Excel.

Resultados e Discussão

Na Figura 1 são mostradas as médias horárias, da temperatura do ar (tar) e umidade relativa do ar (UR), no interior de plantações de cacau à sombra (SB) e ao sol (SL), no Centro de Pesquisas do Cacau (Cepec), Ilhéus, BA. Comparando-se as curvas de temperatura do ar, nas duas condições, observam-se inversões ao longo do dia, com temperatura maiores nos cacau cultivados a pleno sol entre 14:00 e 05:00 h, com média de 1,5 °C superior aos à sombra, e menores entre 06:00 e meio dia.

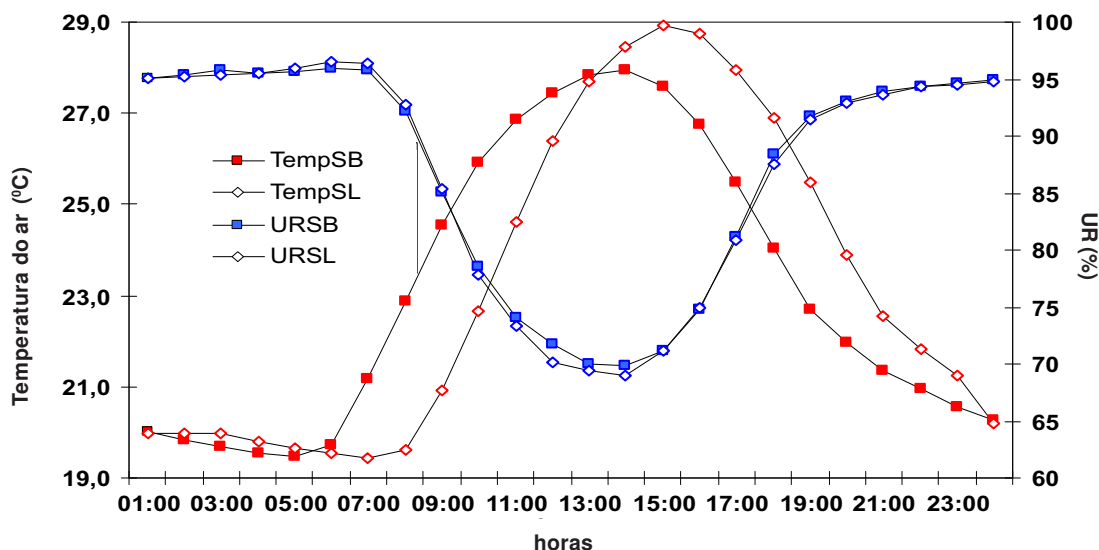


Figura 1. Médias horárias da temperatura (Temp) e umidade relativa do (UR) em plantações de cacau à sombra (SB) e ao sol (SL). Centro de Pesquisas do Cacau (Cepec), Ilhéus, BA.

Destaca-se, entretanto, não somente as diferenças entre si, mas as inversões térmicas entre as duas condições (entre 08:00 e 12:00 h e de 13:00 às 23:00 h). No primeiro intervalo, a temperatura do ar nos cacauceiros ao sol foi, em média, 2,7 °C menor do que os à sombra. Já, no período vespertino, houve uma inversão, ou seja, a temperatura foi 1,7 °C maior, em média.

Com relação à umidade relativa, verifica-se que as diferenças entre si são muito pequenas (<5%), quando se compara os valores médios da UR nos cacauceiros ao sol com os à sombra. Mesmo assim, constata-se que há uma tendência (maior frequência), da UR ser maior nos cacauceiros à sombra logo após o ocaso do sol até as primeiras horas da manhã. Esse aumento na

umidade relativa não significa, necessariamente, que exista mais vapor de água neste período, mas se deve a diminuição da temperatura, por ser este elemento uma função inversa da UR.

As Figuras 2 e 3 mostram, de forma resumida, as médias horárias da temperatura do ar e umidade relativa para as duas condições de cultivo do cacauceiro (sombra e sol). Observa-se que, há diferenças marcantes na temperatura do ar, quando se compara o inverno com o verão. A diferença entre si foi de 3,7 °C, em média, porém as oscilações foram sempre maiores nos cacauceiros cultivados ao sol, especialmente, nos horários de maior disponibilidade de energia (entre 12:00 e 15:00 h).

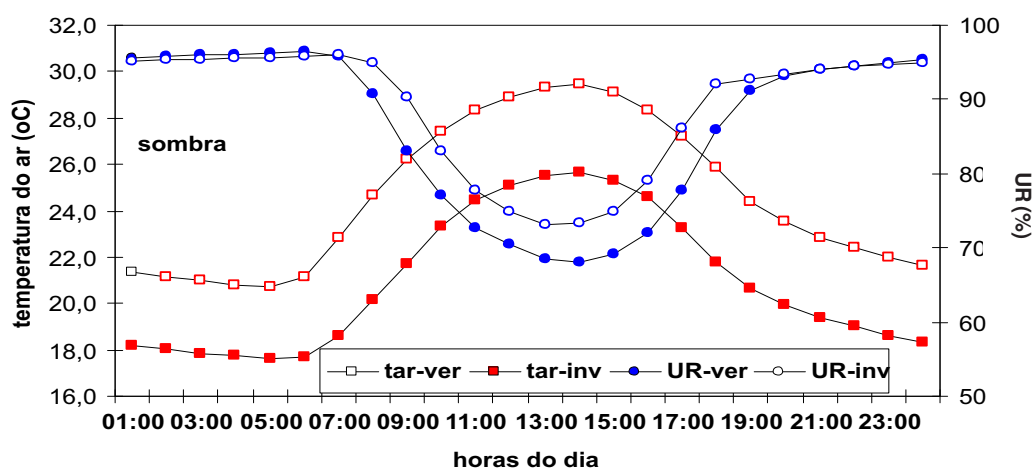


Figura 2. Médias horárias da temperatura do ar (tar) e umidade relativa (UR), no verão (ver) e inverno (inv), no interior de plantações de cacau cultivados à sombra. Cepec, Ilhéus, BA.

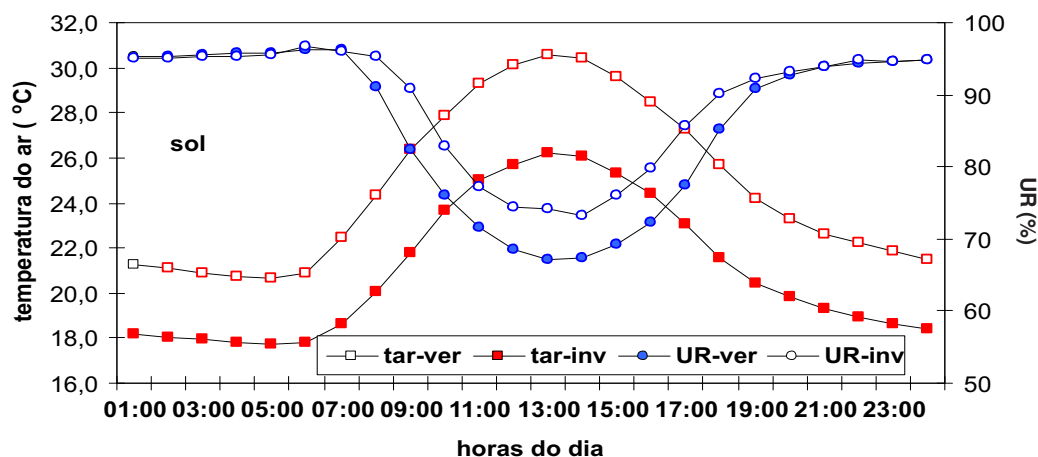


Figura 3. Médias horárias da temperatura do ar (tar) e umidade relativa (UR), no verão (ver) e inverno (inv), no interior de cacauceiros cultivados ao sol. Cepec, Ilhéus, BA.

Com relação à umidade relativa do ar, observam-se (Figuras 2 e 3) pequenas diferenças (médias inferiores a 4%) e menores variações diárias na UR nos cacauzeiros à sombra. Embora exista uma diferença um pouco maior, quando se compara inverno com o verão, nos horários das 08:00 às 18:00 h, uma vez que as médias da UR dos cacauzeiros à sombra foram, respectivamente, de 5,8 e 6,5% maiores que as ao sol.

Embora a saturação do vapor d'água ocorra primeiro nos cacauzeiros sem sombreamento, essa condição perdura, em média, de 2 horas a mais no inverno que no verão, em qualquer condição de cultivo. Como o número de horas diárias com UR 90%, das 18h00min às 09h00min no inverno e das 19:00 às 08:00 no verão, indica, a priori, um elevado potencial para a ocorrência de molhamento por orvalho, o que concorda com os resultados obtidos por Almeida e Machado (2009).

As variáveis psicrométricas estimáveis tais como: pressão de saturação (e_s), pressão parcial de vapor (e_a), déficit de pressão de vapor (DPV) e temperatura do ponto de orvalho (t_o) são apresentadas nas Figuras 4, 5 e 6. Como a pressão máxima de saturação de vapor é uma função exclusiva e exponencial da temperatura, observa-se (Figura 4) que o formato das suas curvas tem uma grande semelhança com o de temperatura da Figura 1. Com relação aos resultados da pressão parcial de vapor, por ser um elemento do clima que depende

das temperaturas do ar e do bulbo, da depressão psicrométrica e, até do tipo de psicrômetro, a forma de variação da curva ao sol e à sombra é bem diferente da pressão máxima saturante.

Comparando-se cada uma das variáveis, verifica-se que a pressão máxima de saturação e a pressão parcial de vapor, dos cacauzeiros ao sol, quando comparado com os à sombra, ambas tendem a ser menor ou igual no período compreendido entre o acaso e nascer do sol e maior no período diurno.

Se num dado instante, a pressão parcial de vapor é menor que a pressão de saturação ($e_a < e_s$), se diz que existe um déficit de pressão. Como a pressão parcial de vapor, para um determinado local e tempo, é praticamente constante, o aumento na temperatura do ar, resulta num aumento de e_s e, conseqüentemente, num maior déficit.

A própria definição de umidade relativa do ar (razão entre e_a/e_s) constitui por si só uma outra maneira para expressar se há um maior ou um menor déficit. As relações existentes entre o DPV e a UR são apresentadas na Figura 5. As curvas de DPV são inversamente proporcionais as de UR. Contabilizando-se valores numéricos médios da variável psicrométrica do déficit de pressão de vapor, verifica-se que, o DPV é quase nulo entre 19:00 e 05:00h da manhã, maior ao sol que à sombra das 06:00 às 09:00h e menor 10:00 e 17:00 h.

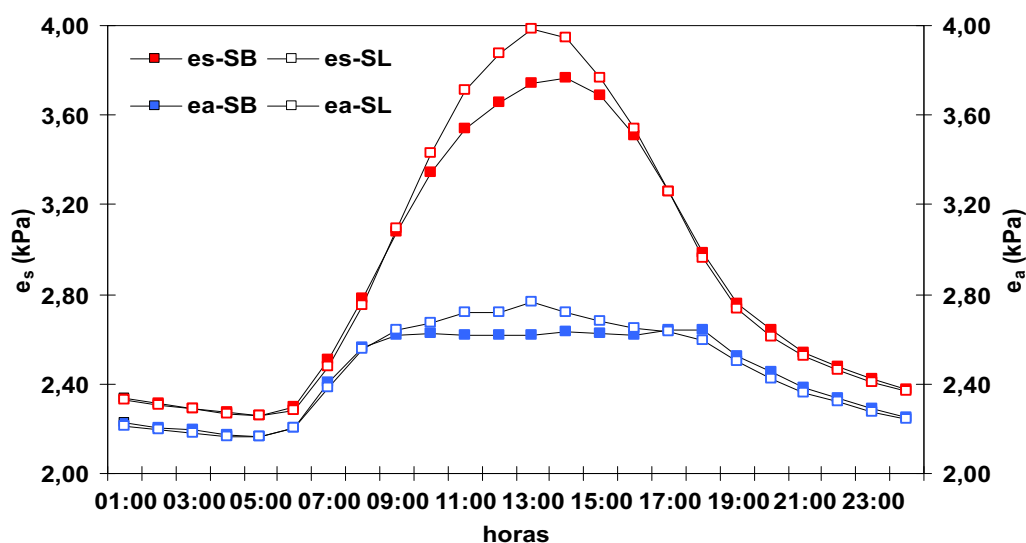


Figura 4. Médias horárias da pressão parcial (e_a) e de saturação de vapor d'água (e_s), no interior de cacauzeiros cultivados à sombra (SB) e ao sol (SL). Cepec, Ilhéus, BA.

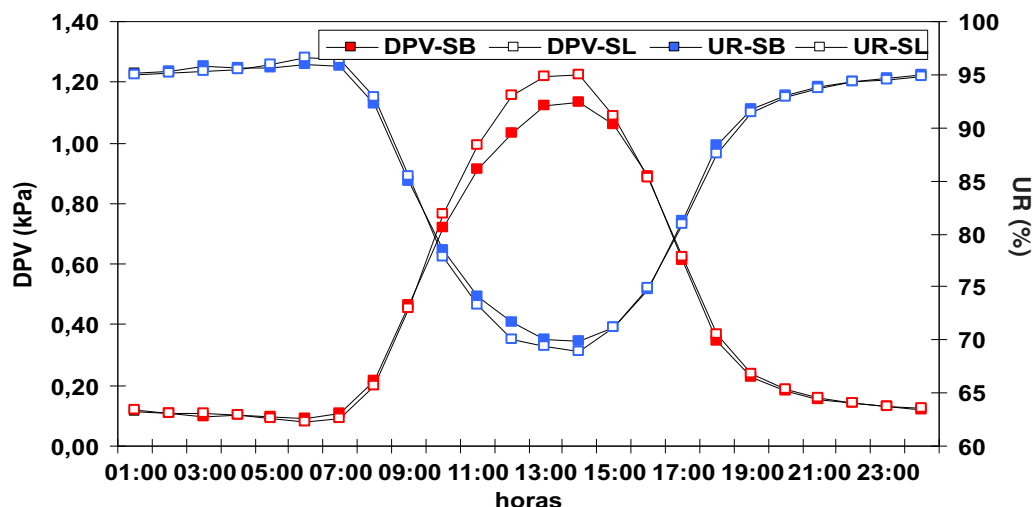


Figura 5. Médias horárias do déficit de pressão de vapor (DPV) e da umidade relativa (UR), no interior de cacauzeiros cultivados à sombra (SB) e ao sol (SL). Cepec, Ilhéus, BA

A temperatura do ponto de orvalho (t_o) é definida como “a temperatura na qual a saturação ocorre se o ar fosse resfriado a pressão constante, sem a adição ou remoção de vapor”, ou seja, é a temperatura na qual a quantidade de vapor presente na atmosfera estaria em sua máxima concentração. Assim, a t_o é aquela em que a pressão parcial de vapor (e_a) se torna saturante pela redução de temperatura, sem adição ou remoção de vapor.

Resultados encontrados por Almeida e Machado (2009) indicaram que em um ecossistema cacau, as partes do cacauzeiro abaixo do dossel, por aprisionar mais irradiância emitida (ondas longas) durante a noite, se resfriam menos e, conseqüentemente, terão menor tempo para deposição de orvalho.

A Figura 6 mostra as médias horárias da pressão parcial de vapor e da temperatura do ponto de orvalho, para as condições à sombra e ao sol. Observando-se as curvas de cada uma das variáveis isoladamente, observa-se, em geral, um padrão mais uniforme no período noturno e desuniformidade no diurno. Verifica-se, a existência de uma igualdade, especialmente, entre 00:00 e 05:00 da manhã, o que revela saturação do ar e afastamento à medida que aumenta a incidência de irradiância solar. Constata-se, ainda, que tanto a temperatura do ponto de orvalho quanto à pressão parcial de vapor, na condição sol, são maiores nos horários compreendidos entre 09:00 e 16:00 h e a partir deste horário há uma inversão.

É importante destacar que, tanto as características térmicas, higrotérmicas quanto às demais variáveis psicrométricas do ar, no interior de plantações de cacau à sombra e ao sol, são variáveis nas escalas temporal (horas, dia, mês e estações do ano) e espacial (local). Esses resultados concordam com os encontrados por Almeida e Machado (2008), em que as médias horárias das temperaturas do ar, do ponto de orvalho e do déficit de pressão de saturação de vapor foram maiores em Ilhéus que em Camacan.

Com os dados médios horários de temperatura do ar e umidade relativa, para as duas condições, foram estabelecidos os modelos de regressão linear, expressas nas Figuras 7 e 8.

Os elevados coeficientes de determinação ($r^2=0,987$) entre temperatura do ar ao sol versus temperatura do ar à sombra e de $r^2 = 0,994$ entre umidade relativa do ar ao sol versus umidade relativa à sombra, demonstram as elevadas precisões nas estimativas da temperatura e da umidade relativa ao sol, a partir dos valores medidos à sombra.

Os índices estatísticos de precisão, exatidão e de confiança, são mostrados na Tabela 1. As pequenas diferenças numéricas entre eles não foram significativas pelo teste t, a 5% de probabilidade. As avaliações conjuntas dos modelos (precisão e exatidão) mostram índices de confiança (c) superiores a 0,9; considerados como sendo ótimos por Camargo e Sentelhas (1997).

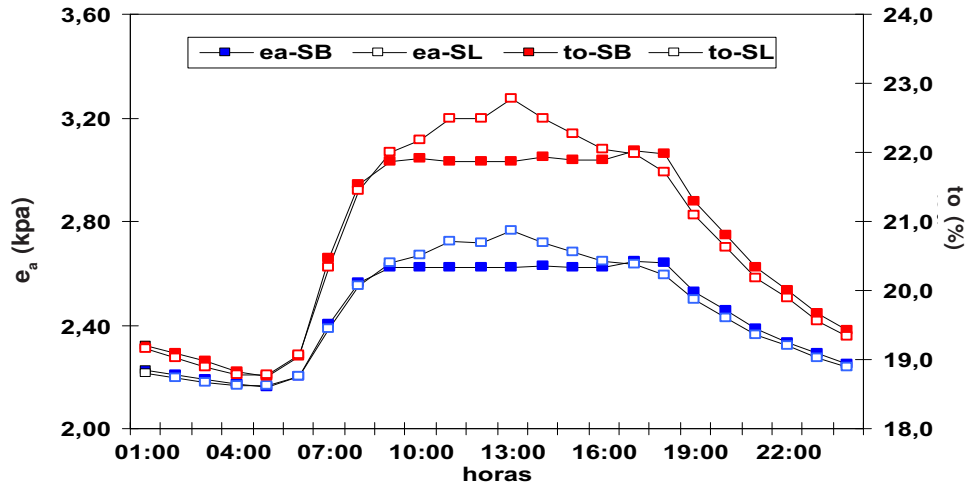


Figura 6. Médias horárias da pressão parcial de vapor d'água (e_a) e da temperatura do ponto de orvalho (t_o), no interior de cacauzeiros cultivados à sombra (SB) e ao sol (SL). Cepec, Ilhéus, BA.

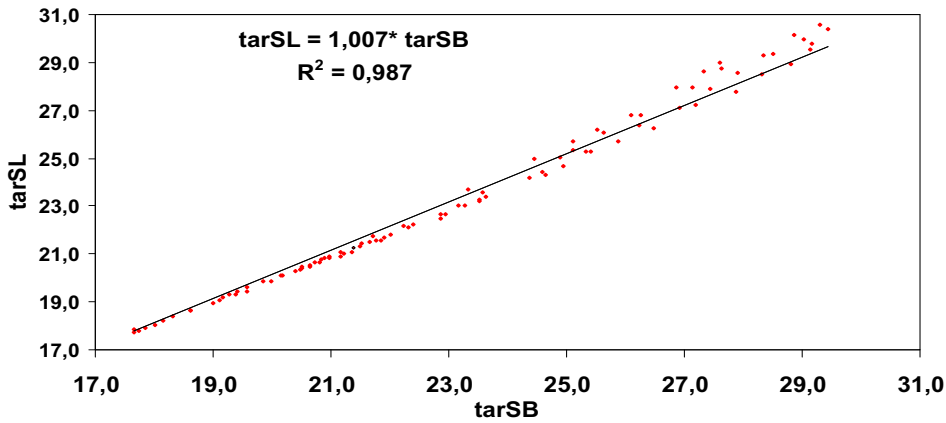


Figura 7. Equação de regressão linear entre a temperatura do ar (tar) em plantações de cacauzeiros ao sol (SL) e à sombra (SB). Cepec, Ilhéus, BA.

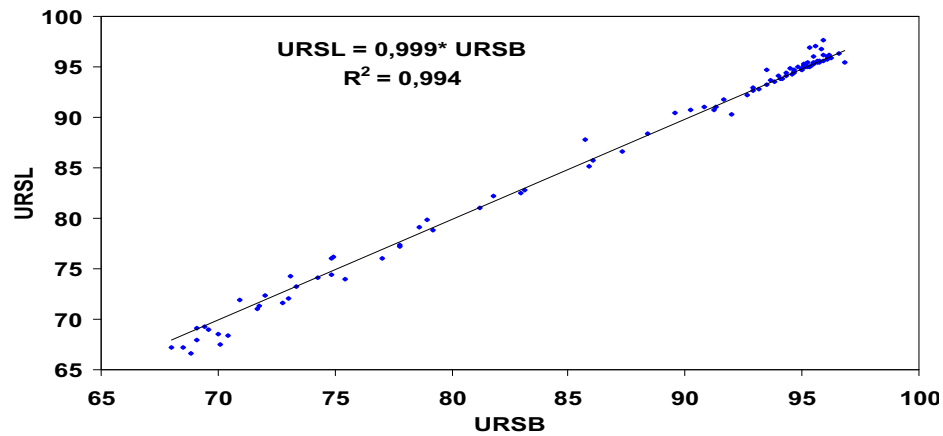


Figura 8. Equação de regressão linear entre a umidade relativa do ar (UR) em plantações de cacauzeiros ao sol (SL) e à sombra (SB). Cepec, Ilhéus, BA.

Tabela 1. Índices estatísticos de precisão (r^2), exatidão (d) e confiança (c) dos modelos de regressão linear para estimar a temperatura do ar e umidade relativa, para cacauzeiros cultivados ao sol. Cepec, Ilhéus, BA

Modelos	r^2	d	c
tarSL x tarSB	0,987	0,994	0,987
URSL x URSB	0,994	0,999	0,996

Conclusões

a) Há uma inversão térmica diária nas duas condições de cultivo, com temperatura do ar 2,7 °C maior, nos cacauzeiros ao sol em relação com os à sombra, e de 1,7 °C menor, nos períodos matutino e vespertino, respectivamente;

b) Há diferenças marcantes (3,7 °C, em média) na temperatura do ar, quando se compara o inverno com o verão, sendo sempre maiores nos cacauzeiros ao sol e nos horários de 12:00 às 15:00 h;

c) As variações diárias da umidade relativa do ar nos cacauzeiros à sombra foram menores que nos ao sol;

d) As médias da UR, nos horários das 08:00 às 18:00 e nos meses de inverno, em relação aos de verão, foram 5,8 e 6,5% maiores nos cacauzeiros à sombra que os ao sol, respectivamente;

e) A saturação do ar perdura por 2 horas a mais no inverno que no verão;

f) As pressões parcial e máxima de saturação de vapor d'água, dos cacauzeiros ao sol, em relação os à sombra, tendem a ser menores ou iguais entre o acaso e nascer do sol e maiores, no período diurno;

g) Os índices estatísticos encontrados nos modelos de regressão da temperatura do ar e umidade relativa, para cacauzeiro ao sol, indicam exatidão e precisão nas suas estimativas a partir dos respectivos valores medidos à sombra.

Literatura Citada

- ALMEIDA, H. A., MACHADO, R. C. R. M. 2009. Estimativa da duração do período de molhamento por orvalho em um ecossistema cacau. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 13(6):724-728.
- ALMEIDA, H. A., MACHADO, R. C. R. M. 2008. Características termodinâmicas do ar no interior de plantações de cacau no sudeste da Bahia. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 16(1): 39-48.
- ALMEIDA, H. A. de. 1997. Evapotranspiração, balanço hídrico e modelo de estimativa de produção de cacau (*Theobroma cacao* L.) em função da disponibilidade de água no solo e energia. Tese de Doutorado. Botucatu, UNESP/FCA. 170p.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 5(1):89-97.
- JUPP, D. L. B. 2003. Calculating and converting between common water vapour measures in meteorological data and their use in support of earth observation. Canberra: CSIRO Earth Observation Centre Technical Report. 49p.
- OLIVEIRA, M. L.; LUZ, E. D. M. N. 2005. Identificação e manejo das principais doenças do cacauzeiro no Brasil. Ilhéus, BA. CEPLAC/CEPEC/SEFIT. 132p.
- SINGH, A. K. et al. 2002. Numerical calculation of psychrometric properties on a calculator. *Building and Environment* 37(4):415-419.
- TETENS, O. 1930 Über einige meteorologische Begriffe. *Zeitschrift Geophysic, Wurzburg* 6: 297-309.
- WILLMOTT, C. J. et al. 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research* 90(5):8995-9005. ●