



Estudo da viabilidade da produção de água a partir do resfriamento do ar

Genival da Silva¹ & Francisco de A. S. de Sousa²

RESUMO

Pesquisas realizadas nos municípios paraibanos de Campina Grande e São João do Cariri comprovam a viabilidade da produção de água potável a partir da formação do orvalho em superfícies refrigeradas por sistemas convencionais de refrigeração ou pelo uso de garrafas PET contendo gelo. Os resultados experimentais aqui apresentados mostram que o resfriamento do ar pode produzir quantidades suficientes de água para minimizar as consequências da escassez de água potável na região Semi-árida do Nordeste brasileiro. O experimento, baseado no contato direto do ar com a superfície fria do sistema de refrigeração, produziu orvalho a uma taxa de $1,23 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Para produzir um litro de orvalho, este sistema consome, em média, 0,75 kWh de energia elétrica. Os resultados obtidos são satisfatórios considerando-se que o equipamento experimental utilizado é bastante simples.

Palavras-chave: água potável, orvalho, vapor d'água

Study of the viability of water production by air cooling

ABSTRACT

Research carried out in the municipalities of Campina Grande and São João do Cariri prove the viability of the production of drinking water by the formation of the dew on cold surfaces of conventional refrigeration systems or on external surfaces of PET bottles containing ice. The experimental results presented here show that the cooling of air can produce enough quantity of water to minimize the consequences of shortage of drinking water in the semiarid zone of the Brazilian Northeast region. The experiment based on direct contact between the air and the cold surface of the refrigeration system produced dew at a rate of $1.23 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$. To obtain a liter of dew, the system consumes, on average, 0.75 kWh of electrical energy. The obtained results are satisfactory, considering that the experimental equipment used is quite simple.

Key words: dew, drinking water, water vapour

¹ DF/UEPB. Avenida das Baraúnas 351, Bodocongó, CEP 58109-753, Campina Grande, PB. Fone: (83) 3315-3338. E-mail: professorgenival@uepb.edu.br

² UACA/UFCG. Rua Aprígio Veloso 882, Bodocongó, CEP 58109-900, Campina Grande, PB. Fone: (83) 3310-1202. E-mail: fassis@dca.ufcg.edu.br

INTRODUÇÃO

Os primeiros cinco quilômetros da atmosfera contêm aproximadamente 90% da massa total de vapor d'água. Este percentual representa apenas 0,001% de toda a massa de água existente no planeta Terra, ou dez vezes o volume de águas contidas nos rios. Se todo este vapor d'água fosse condensado e distribuído uniformemente sobre toda a superfície da Terra, formaria uma lâmina de água de aproximadamente 25 mm de altura (Garcez & Alvarez, 1988). A formação do vapor d'água se deve ao aquecimento das superfícies cobertas por água, dos solos úmidos (evaporação) e das superfícies vegetadas (transpiração), devido à radiação solar.

O Nordeste brasileiro, situado aproximadamente entre as latitudes de 1 e 18° S e longitudes de 34 e 48° W, possui grande diversidade climática. Pode-se encontrar desde clima semi-árido com chuvas anuais abaixo de 500 mm, no interior da região, até clima tropical chuvoso, na costa Leste e no Norte do Maranhão, com totais anuais precipitados acima de 1.600 mm (Rao et al., 1996).

O Brasil possui cerca de 12% das reservas de água doce disponível nas bacias hidrográficas do Planeta. Mesmo com todo esse potencial hídrico, o interior do Nordeste Brasileiro, mais precisamente a região semi-árida, sofre permanentemente com a escassez hídrica. Dentre os estados brasileiros, a Paraíba, com 1.320 m³ hab⁻¹ ano⁻¹, é o que possui o segundo menor potencial hídrico do País, superado apenas pelo estado de Pernambuco, com um potencial hídrico de 1.171 m³ hab⁻¹ ano⁻¹ (Sousa & Leite, 2003).

O semi-árido paraibano é caracterizado por baixas médias pluviométricas, altos índices de evapotranspiração, e ocorrências de chuvas em um período muito curto do ano com uma distribuição temporal e espacial bastante irregular. As variações pluviométricas na região Nordeste estão entre os efeitos mais evidentes do El Niño Oscilação Sul (ENOS) que, efetivamente, devem receber maior destaque, pois delas dependem, praticamente, todas as atividades desenvolvidas no meio rural, com influência direta na economia do semi-árido (Moraes Neto et al., 2007).

Apesar do seu clima semi-árido, o interior do estado da Paraíba apresenta em sua climatologia umidade específica que atinge valores consideráveis (15 g kg⁻¹) devido, principalmente, ao transporte de vapor d'água do oceano para o continente, feito pela circulação geral da atmosfera predominantemente de Sudeste.

No início do século vinte, foram realizadas algumas tentativas de se construir estruturas capazes de recuperar a água contida no vapor atmosférico a partir do orvalho. O primeiro aparato experimental que se tem registro foi construído na Criméia, Ucrânia, em 1912, pelo engenheiro Russo F. I. Zibold (Nikolayev et al., 1996). Não foram encontrados registros sobre o volume de orvalho produzido neste experimento.

Resultados de pesquisa realizado no Bahrain, Golfo Pérsico (Alnaser & Barakat, 2000), mostram que o volume de água de orvalho formado a partir do resfriamento radiativo de alguns materiais é relativamente baixo. Os maiores volumes de orvalho foram produzidos com o uso de placas de alumínio, com uma produção máxima diária de 1 L m⁻².

Estimativas dessa pesquisa indicam uma produção diária de até 31 L m⁻² se forem utilizadas placas de alumínio resfriadas a uma temperatura de 0 °C.

Pesquisa semelhante foi realizada na ilha de Córsega, Mar Mediterrâneo. Foram utilizados dois grandes condensadores confeccionados de polietileno, cada um com uma área de 30 m². A produção de orvalho máxima diária obtida foi de 0,12 L m⁻² (Muselli et al. 2006).

Foi desenvolvido um equipamento que produz água potável a partir do resfriamento do ar. Especificações técnicas contidas no manual do equipamento mostram que

Neste estudo se propõe a produção de água, por meio do orvalho, a partir do resfriamento do ar, com base no teor de vapor d'água existente e nas baixas temperaturas atingidas durante o período noturno. Na perspectiva de se obter água para consumo humano, este trabalho tem, como objetivo primordial, o estudo da viabilidade da produção de água potável a partir do resfriamento do ar na região do Cariri Paraibano, e a análise da relação volume produzido versus custo de produção. Este primeiro estudo foi efetuado para os municípios de Campina Grande e São João do Cariri.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O interior da região Nordeste do Brasil, denominado Polígono das Secas, apresenta clima semi-árido, cuja precipitação média anual é cerca de 500 mm. Com relação aos recursos hídricos à superfície, predominam os rios intermitentes que escoam apenas no curto período chuvoso. Em consequência dessas características a população da região é bastante penalizada pela falta de água, principalmente da potável, situação que se torna mais crítica durante os longos períodos de estiagens, bastante comuns. Os municípios paraibanos de Campina Grande e São João do Cariri (Figura 1), locais em que foram realizados os primeiros experimentos desta pesquisa, estão situados no semi-árido paraibano.

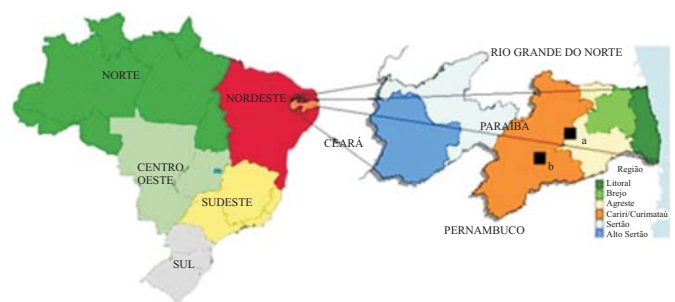


Figura 1. Regiões climáticas do Estado da Paraíba e localização de Campina Grande (a) e São João do Cariri (b)

Em Campina Grande os experimentos foram realizados em dois locais: em um terreno localizado no bairro do Catolé (7° 13' 45" S; 35° 52' 32" W; 514 m) e na estação meteorológica da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas – UACA, localizada no Campus I da Universidade Federal

de Campina Grande – UFCG (7° 12' 52" S; 35° 54' 27" W; 525 m). Em São João do Cariri o local escolhido foi o Sítio Farias (7° 27' 48" S; 36° 30' 32" W; 492 m).

A Tabela 1 exibe os dados climáticos referentes à temperatura e à umidade relativa do ar de quatro municípios paraibanos, todos localizados na região semi-árida. Pode-se notar que os valores médios anuais de umidade relativa e de temperatura do ar são semelhantes.

Tabela 1. Dados climatológicos (médias anuais) dos municípios de Campina Grande, Monteiro, São João do Cariri e Soledade, localizados na região semi-árida do Cariri Paraibano

Municípios	Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)		
	Máx.	Min.	Média	12:00	18:00	24:00
C. Grande	29,0	19,1	22,7	84,3	57,4	87,2
Monteiro	30,5	19,0	23,3	72,5	57,6	84,1
S. J. do Cariri	30,8	19,5	24,0	78,8	57,5	84,7
Soledade	29,3	18,9	24,2	79,5	57,6	82,9

Fonte: UACA/ UFCG

Cálculos meteorológicos e termodinâmicos

A quantidade de vapor d'água presente na atmosfera é determinada a partir da pressão real do vapor (e) e da pressão atmosférica (p). A massa de vapor d'água por unidade de massa de ar úmido, ou seja, a umidade específica (q), é calculada por:

$$q = \frac{622e}{p - 0,378e} \quad (1)$$

em que, neste caso, (q) é expressa em g kg^{-1} , (e) e (p) devem ser expressas nas mesmas unidades de pressão, em geral, kPa.

Determina-se (e) a partir da umidade relativa do ar (UR) e da pressão de saturação do vapor d'água (e_s), que são relacionados por:

$$UR = \frac{e}{e_s} \times 100 \quad (2)$$

em que UR é expressa em porcentagem (%).

A quantidade máxima de vapor d'água presente na atmosfera é função da temperatura do ar. Ao atingir o valor máximo para dada temperatura, a pressão real de vapor (e) atinge seu valor máximo (e_s) e o ar se torna saturado. O valor de e_s para a temperatura do ar T , pode ser calculado a partir da equação de Tetens (Vianello & Alves, 2004), como segue:

$$e_s = 6,1078 \times 10^{\left(\frac{7,5T}{237,3+T}\right)} \quad (3)$$

em que (e_s) é dado em mb e T em °C.

A estimativa da massa de orvalho condensada (em kg m^{-3}), quando o ar é resfriado de uma temperatura T até T_s , é calculada por (Iribarne, 1985):

$$\Delta m = - \frac{\Delta e_s}{R_v T} \quad (4)$$

sendo R_v a constante específica do vapor ($461,5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T a temperatura do ar (em Kelvin) e " e_s " a diferença das pressões de vapor à saturação nas temperaturas T e T_s .

Ao ser resfriado, o ar transfere calor para a placa. A taxa de transferência de calor por unidade de área ("Q") é dada pela soma do calor sensível ("Q_s) e do calor latente de condensação ("Q_L), expressos em Joules, ou seja:

$$\Delta Q = \Delta Q_s + \Delta Q_L \quad (5)$$

O valor de ΔQ_s é calculado por:

$$\Delta Q_s = m c_p \Delta T \quad (6)$$

em que m é a massa de ar úmido (em kg), c_p é o calor específico do ar úmido a pressão constante (em $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e ΔT a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura da superfície fria (em K). O valor de c_p é dado por (Iribarne, 1985):

$$c_p = c_{pd}(1 + 0,87q) \quad (7)$$

sendo c_{pd} o calor específico do ar seco a pressão constante ($c_{pd} = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e q a umidade específica do ar. O calor latente (ΔQ_L) transferido do vapor d'água para a superfície de condensação, durante a formação do orvalho, é dado por:

$$\Delta Q_L = \Delta m L_v \quad (8)$$

em que Δm é a massa de orvalho formada e L_v o calor latente de vaporização da água, cujo valor é de $2,501 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$.

Aparato experimental

Nos primeiros experimentos desta pesquisa, realizados em Campina Grande, PB, utilizou-se o congelador de um refrigerador de uso doméstico como superfície de condensação. No período de 07/09/2003 a 27/02/2004, o orvalho se formou sobre a superfície fria do congelador mantido dentro do refrigerador com a porta aberta durante todo o tempo em que ficou ligado; posteriormente, o congelador foi retirado do refrigerador, ficando exposto ao ar ambiente; o congelador foi, então, utilizado no período de 30/10/2005 a 18/02/2006. Na última etapa de uso do sistema de refrigeração se utilizou apenas a tubulação que envolve o congelador (evaporador), a qual foi retirada do refrigerador, ficando totalmente exposta ao ar ambiente.

A água produzida sobre a superfície refrigerada do tubo com área total de aproximadamente $0,13 \text{ m}^2$, foi coletada em uma bandeja posicionada abaixo do congelador. O volume da água foi medido com uma proveta com capacidade de 2,0 L. As medidas de consumo de energia elétrica foram feitas através de um medidor igual aos utilizados em residências.

A dificuldade em se transportar o sistema de refrigeração para os diversos locais onde foram realizadas as experiências, inviabilizou sua utilização. Para substituir o congelador como superfície de condensação, utilizou-se um aparato experimental que pudesse ser facilmente transportado e manuseado, mesmo em locais sem disponibilidade de energia elétrica.

O novo aparato foi construído de forma que o custo fosse o menor possível, sem prejuízo experimental, ou seja, que com ele se obtivessem resultados satisfatórios a fim de que a viabilidade de futuras pesquisas sobre o tema fosse mantida. Na Figura 2 podem ser vistos os instrumentos usados para efetuar as medições da temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, massa de orvalho produzida e temperatura da superfície de condensação. Como superfícies condensadoras de vapor d'água foram utilizadas garrafas PET (Polietileno Tereftalato) com capacidade de 2,5 L, e área de superfície lateral de aproximadamente 0,1 m².

O volume de orvalho formado é relacionado sobretudo com umidade relativa do ar, temperatura do ar, temperatura da superfície do condensador e velocidade do vento. Nas primeiras experiências desta pesquisa se optou por realizar medidas de temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e temperatura da superfície de condensação, o que fez com que houvesse redução no número de instrumentos utilizados na montagem experimental. No decorrer dos trabalhos, algumas experiências foram realizadas na estação meteorológica da UACA/UFCG onde também se obtiveram medidas da velocidade do vento, visto que sua presença é fator de grande influência no transporte de vapor d'água e, portanto, no volume de orvalho produzido.

Com a substituição do congelador pelo aparato experimental mostrado na Figura 2, o resfriamento das garrafas PET foi feito a partir do congelamento da massa de água nelas contida, com o uso de um freezer. Após o congelamento, as garrafas PET, contendo gelo, foram posicionadas no suporte e expostas ao ar. Sempre que o ar úmido entra em contato com a superfície fria das garrafas PET, o vapor atmosférico é condensado. A massa de orvalho formada foi medida com uma balança digital com precisão de um grama.

As medidas da massa de água condensada feitas, inicial-

mente, através de uma balança digital com precisão de um grama, passaram a ser obtidas automaticamente com a inclusão de uma balsa (Figura 3). A balsa envia os dados lidos a um computador, através da porta paralela. Com a inclusão da balsa no experimento, as medidas da massa de orvalho passaram a ser feitas a partir do número de movimentos da mesma registrados em cada intervalo de tempo predefinido, em um arquivo com extensão csv. Além da massa de orvalho produzida foram feitas, também, medidas da temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica. As temperaturas da superfície de condensação eram estimadas a partir das medidas das resistências elétricas dos termistores usados.



Figura 3. Balsa adaptada ao experimento

Para se efetuar as medições da temperatura da superfície de condensação, utilizaram-se termistores do tipo NTC (Negative Temperature Coefficient) acoplados a um multímetro digital. Obteve-se a equação da curva de calibração a partir de uma regressão logarítmica, dada por:

$$T = -25,158 \times \ln R + 82,421 \quad (9)$$

Nos experimentos realizados na Estação Meteorológica da UACA/UFCG, foram feitas apenas medidas da massa de orvalho e da resistência elétrica dos termistores, já que os demais dados meteorológicos foram obtidos da própria estação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 exibe os valores do tempo de exposição da superfície de condensação "t, o volume de água condensado "V, a umidade relativa do ar média (UR) e a energia elétrica "E consumida em cada intervalo de tempo. A superfície de condensação utilizada foi o congelador, em sua posição original dentro do refrigerador, com área de 0,36 m². A partir desses dados se calcularam as médias horárias do volume de água produzido e do consumo de energia. Também se obtiveram as médias do consumo de energia para cada litro de água produzido e do volume de água produzido por metro quadrado, por hora. Como o experimento foi realizado em ambiente fechado, a condensação ocorreu sem presença do

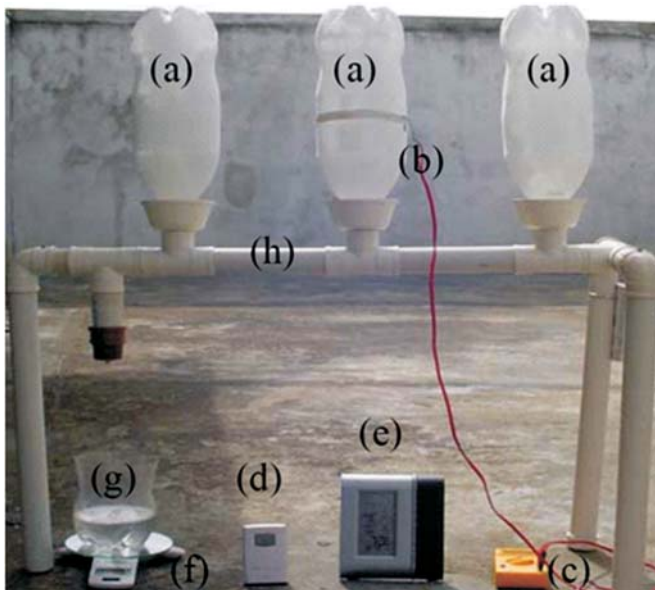


Figura 2. Montagem experimental: (a) garrafas PET; (b) termistor; (c) multímetro digital; (d) e (e) medidores de temperatura do ar, umidade relativa do ar e pressão atmosférica; (f) balança digital; (g) recipiente coletor de orvalho; (h) tubos de PVC

vento. O consumo médio de energia necessária para se produzir um litro de água nessa série inicial de medidas, foi de 1,88 kWh L⁻¹, para a produção média de 0,181 L m⁻² h⁻¹. A utilização direta de equipamento de refrigeração como superfície de condensação do vapor d'água, facilita a estimativa do consumo de energia gasto no processo.

Tabela 2. Valores médios da umidade relativa do ar (UR), umidade específica do ar (q), energia consumida por litro de água produzido ($\Delta E/\Delta V$) e volume de água produzido por unidade de área por hora ($\Delta V/A \Delta t$)

Superfície de condensação	<UR> (%)	<q> (g kg ⁻¹)	< $\Delta E/\Delta V$ > (kWh L ⁻¹)	< $\Delta V/A \Delta t$ > (L m ⁻² h ⁻¹)
Congelador dentro do refrigerador	69,7	14,38	1,88	0,18
Congelador retirado do refrigerador	83,0	15,31	1,12	0,30
Tubo evaporador	82,6	16,16	0,75	1,23

A Figura 4A mostra a temperatura da superfície de condensação (T_s), o valor médio da diferença entre as umidades específicas nas temperaturas T e T_s ($\langle q - q_s \rangle$) e a massa de orvalho produzida (Δm) entre 18 e 24 h do dia 21/05/2006, em experimento realizado em ambiente externo, na cidade de Campina Grande, PB.

De acordo com os dados apresentados, pode-se inferir que, em sendo mantida a temperatura das garrafas PET em torno de 6 °C, com a temperatura do ar em torno de 25 °C e umidade relativa do ar em cerca de 80%, é possível atingir a produção diária de 6 litros de água por metro quadrado de superfície refrigerada. Observando-se o comportamento do gráfico exibido, verifica-se que Δm e $\langle q - q_s \rangle$ estão bem relacionados.

A Figura 4B indica os resultados experimentais obtidos em ambiente aberto, no dia 27/05/2006, na localidade Sítio Farias, situada a aproximadamente 12 km cidade de São João do Cariri, PB, região do Cariri Paraibano. Comparando-se o orvalho produzido no Sítio Farias com os valores produzidos em Campina Grande, nota-se que nas três primeiras horas de condensação houve um acréscimo de 77%. A presença do vento e a alta umidade específica do ar foram fatores que influenciaram sobremaneira na obtenção desses resultados. Verifica-se, ainda, que a temperatura da superfície de condensação aumentou rapidamente em consequência sobretudo da presença do vento e do volume de orvalho condensado.

Mantendo-se a temperatura da superfície das garrafas PET em torno de 12 °C, sob condições meteorológicas semelhantes às do dia 27/05/2006, é possível a obtenção diária de 11 L de água por metro quadrado de superfície refrigerada.

A velocidade do vento e a diferença entre as pressões parciais de vapor d'água a temperaturas do ar e da superfície de condensação, são fatores que determinam a quantidade de orvalho produzida. A Figura 4C mostra os valores das quantidades de orvalho produzidas em experiência realizada na estação meteorológica da UACA, no dia 13/12/2006, além dos dados meteorológicos obtidos da própria estação. Verifica-se, a partir das 20 h, que ocorreu a maior concen-

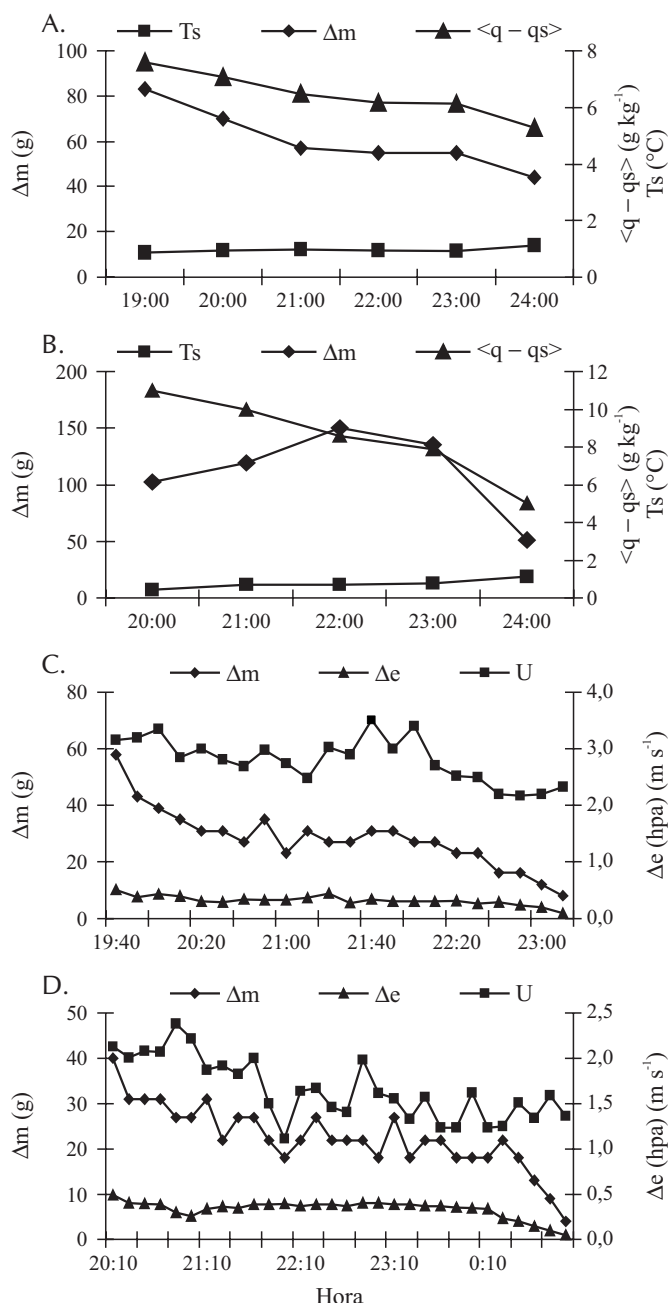


Figura 4. Massa de orvalho produzida em diferentes datas e locais

tração da massa de orvalho (Δm) mas, à medida que o tempo foi passando, deu-se um decréscimo na mesma; já a velocidade do vento a um metro de altura da superfície foi praticamente constante no mesmo período.

Na Figura 4D se encontram os valores das quantidades de orvalho produzidas em experiência realizada na estação meteorológica da UACA/UFCG, nos dias 21 e 22/12/2006. Verificou-se que o intervalo de tempo em que ocorreu a condensação no experimento realizado em 13/12/2006 (três horas e quarenta minutos) foi bem menor que o verificado no experimento realizado nos dias 21 e 22/12/2006 (cinco horas); esta diferença está relacionada à maior intensidade do vento, constatado no dia 13/12/2006. A área da superfície de condensação nesses dois experimentos foi de 0,3 m². Pode-se verificar, também, na Figura 4D, semelhanças na

variação da massa de orvalho produzida e na intensidade do vento.

A apresentação de projetos nessa linha de pesquisa a órgãos financiadores com a parceria de organizações que atuam na preservação do meio ambiente e na ação social, poderá contribuir no processo de fixar o homem do campo em seu lugar de origem, evitando sua migração para a periferia das grandes cidades.

O sol e o vento podem ser avaliados como fontes alternativas de energia utilizadas nos equipamentos de refrigeração para a produção de água, caso em que a geração de energia seria feita a partir da instalação de geradores eólicos ou de painéis fotovoltaicos nas localidades onde fossem realizadas as pesquisas.

CONCLUSÕES

1. Utilizando-se superfícies refrigeradas, conclui-se que a produção média horária de orvalho foi de $1,23 \text{ L m}^{-2}$; este valor, quando integrado no tempo, totaliza aproximadamente 12 L m^{-2} , em uma noite (10 h) de funcionamento. O consumo de energia para esta produção é de cerca de 7,5 kWh.

2. Se se utilizarem equipamentos mais eficientes e fontes de energia alternativas (solar e/ou eólica) é possível produzir água potável em quantidade considerável, a partir da condensação da umidade do ar. Esta metodologia poderá ser mais uma fonte alternativa de oferta de água para os habitantes da região semi-árida do Nordeste brasileiro.

LITERATURA CITADA

- Alnaser, W. E.; Barakat, A. Use of condensed water vapour from the atmosphere for irrigation in Bahrain. *Applied Energy*, v.65, p.3-18, 2000.
- Garcez, L. N.; Alvarez, G. A. *Hidrologia*. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1988.
- Iribarne, J. V. *Atmospheric thermodynamics*. 2.ed. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1985. 259p.
- Moraes Neto, J. M. de; Barbosa, M. P.; Araújo, A. E. de. Efeito dos eventos ENOS e das TSM na variação pluviométrica do semi-árido paraibano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.1, p.61-66, 2007.
- Muselli, M.; Beysens, D.; Milimouk, I. A comparative study of two large radiative dew water condensers. *Journal of Arid Environments*, v.70, n.64, p.54-76, 2006.
- Nikolayev, V.; Beysens, D.; Gioda, A.; Milimouk, I.; Katiushin, E.; Morel, J. P. Water recovery from dew. *Journal of Hydrology*, v.182, p.19-35, 1996.
- Rao, V. B.; Hada, K.; Cavalcanti, I. F. A. Annual variation of rainfall over Brazil and water vapor characteristics over South America. *Journal of Geophysical Research*, v.101, p.26539-26551, 1996.
- Sousa, J. T., Leite, V. D. *Tratamento e utilização de esgotos domésticos na agricultura*. 2.ed. Campina Grande: EDUEPB, 2003. p.21-22.
- Vianello, R. L.; Alves, A. R. *Meteorologia básica e aplicações*. 1.ed. Viçosa: UFV, 2004. 449p.