

### III-151 - PILOTO EXPERIMENTAL DE TRATAMENTO DE LIXIVIADOS POR EVAPORAÇÃO NO SEMIÁRIDO: ESTUDOS PRELIMINARES DE INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO

**Perboyre Barbosa Alcântara<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil. Doutor em Geotecnia pela Universidade Federal de Pernambuco. Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE – Campus Juazeiro do Norte), Departamento de Engenharia Ambiental.

**Armando Borges de Castilhos Júnior**

Engenheiro Sanitarista. Doutor em Gestão e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos pelo INSA de Lyon. Professor Associado III do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

**Fernanda Filgueiras de Araújo**

Tecnóloga em Saneamento Ambiental pela Faculdade de Tecnologia CENTEC- Cariri e graduanda do curso de Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE – Campus Juazeiro do Norte).

**José Cássio Ferreira de Sales**

Graduando do curso de Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE – Campus Juazeiro do Norte).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Plácido Aderaldo Castelo, 1646 – Planalto – Juazeiro do Norte - CE- 63040-540 - Brasil - Tel: (088) 2101 5300 - e-mail: [pbalcantara@msn.com](mailto:pbalcantara@msn.com); [perboyre@ifce.edu.br](mailto:perboyre@ifce.edu.br)

#### RESUMO

Os processos de evaporação têm sido estudados com o intuito de fornecer uma solução alternativa aos sistemas tradicionais de tratamento de águas residuárias, especialmente, nas regiões onde possam ser técnica e economicamente viáveis em decorrência das condições climáticas locais. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a instalação e o monitoramento de um sistema, em escala piloto, de tratamento de lixiviados de aterros sanitários utilizando a técnica de evaporação natural com o uso de painel evaporativo de elevada área superficial. O sistema foi instalado em uma região de clima semiárido e os resultados obtidos, são comparados com os dados do monitoramento de um experimento idêntico realizado em clima subtropical úmido. Os resultados preliminares obtidos em Juazeiro do Norte-CE, nos meses de setembro/2010 a fevereiro/2011, em comparação com os dados obtidos em Florianópolis-SC, no período de janeiro/2008 a setembro/2008, indicam uma evaporação média diária 2,5 vezes maior, o que confirma o potencial de utilização de energia solar para o tratamento de lixiviados em regiões de clima semi-árido.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lixiviados, Evaporação Natural, Painéis Evaporativos, Semiárido.

#### INTRODUÇÃO

Dentre as diversas opções para o tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU), o aterro sanitário figura como uma das mais comuns e ainda largamente utilizados, especialmente, nos países em desenvolvimento, devido à facilidade de operação, baixo custo e, também, em virtude dos aspectos sociais envolvidos (ALCANTARA, 2007; HILGER & BARLAZ, 2002). O projeto e a operação de um aterro sanitário são realizados com base de critérios de engenharia e normas operacionais específicas garantindo o controle da poluição ambiental e proteção à saúde pública. Sendo assim, é necessário tratar adequadamente os lixiviados ou percolados, os quais são gerados pela infiltração de água das chuvas que percolam através da massa de resíduos, carreando os produtos da decomposição biológica e os elementos minerais em dissolução e representam a principal fonte de poluição do aterro. Este efluente representa um grande potencial de poluição para as águas superficiais e águas subterrâneas e o tratamento, economicamente viável e ambientalmente adequado, do lixiviado tornou-se, nas últimas décadas, o objeto de estudo de vários pesquisadores em diversas áreas de conhecimento.

As soluções para o tratamento do percolado de aterros sanitários são diversificadas e vários fatores influenciam na sua escolha, desde o aspecto econômico até as características físicas e químicas do efluente. De acordo com Gomes *et al.* (2009), em praticamente todos os países vêm sendo aplicadas técnicas de tratamento de esgoto no tratamento de lixiviado. Os insucessos obtidos, não só no Brasil, mas em todo o mundo, apontam para a necessidade de se repensarem as estratégias até agora adotadas. É preciso que se busquem processos adequados para o tratamento do percolado, os quais possam ser aplicados dentro da realidade brasileira. As características dos lixiviados são altamente variáveis ao longo do tempo (QASIM e CHIANG, 1994) em decorrência de fatores externos como o clima e devido à heterogeneidade da composição dos resíduos sólidos urbanos, portanto os tratamentos devem ter flexibilidade para se adaptar a estas alterações, de modo a não comprometer a eficiência dos sistemas e, portanto, as técnicas de tratamento devem considerar um amplo espectro de possibilidades, a fim de assegurar o correto gerenciamento desse efluente complexo.

Um resumo dos principais tipos de tratamento do lixiviado, consolidados ou não e que têm sido usados em escala de campo ou ainda em caráter experimental, incluem os seguintes sistemas: a) Recirculação; b) Processos Físico-químicos; c) Processos Biológicos (Anaeróbios Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente, Filtros Anaeróbios e Aeróbios, Lagoas Aeradas, Lodos Ativados, Filtros Biológicos); d) Processos de Separação com Membranas; e) Lagoas de Estabilização; e) Processos Oxidativos Avançados (POA's); f) Wetlands; g) Sistema de Barreira Bioquímica e h) Evaporação. Em relação aos tratamentos por evaporação uma das possíveis formas de tratamento é a evaporação natural em painéis evaporativos, que ocorre em função das condições climáticas locais e do aumento da superfície de contato vapor-líquido. Este sistema encontra aplicação para o tratamento de diversos efluentes agroindustriais. Alguns exemplos de uso em escala industrial são o aterro sanitário de Lahti, na Finlândia onde encontra-se em operação, desde 1996, um sistema de tratamento de lixiviados por evaporação com capacidade de 130 m<sup>3</sup>/dia (ETTALA, 1998, apud CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2008). Igualmente, porém em menor escala, no aterro sanitário de Saint Marcellin, na França, o tratamento de lixiviados ocorre através de evaporação, com capacidade de 18 m<sup>3</sup>/dia (Cornu *et al.*, 2003, apud CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2008). Em ambos os casos, os sistemas funcionam com ótima eficiência e rendimento, onde o resíduo final do processo representa 1% do volume total do efluente de entrada.

Atualmente, em escala piloto, está sendo estudado o tratamento de percolados de aterro sanitário, a exemplo do trabalho desenvolvido por Ranzi *et al.* (2009). O processo de evaporação tem sido estudado com o intuito de fornecer uma solução alternativa aos sistemas de tratamento tradicionais, especialmente, nas regiões onde os sistemas de evaporação possam ser técnica e economicamente viáveis, valorizando as vantagens das condições climáticas locais como temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. Na região nordeste do Brasil e, em particular, no semiárido, o elevado índice de radiação da energia solar, os baixos índices de precipitação pluviométrica e a baixa umidade relativa do ar durante um longo período do ano, evidenciam a potencialidade de adaptação de sistemas de tratamento de lixiviado por evaporação. Dados do semiárido nordestino com base em séries variando entre 8 a 25 anos revelam que a evaporação medida em Tanque Classe A (média anual) varia entre 2.700 a 3.300 mm, sendo que os valores mais elevados ocorrem nos meses de outubro a dezembro e mínimos de abril a junho (MOLLE, 1989). Outro aspecto relevante é que a eficiência dos referidos sistemas, depende, fundamentalmente, das características climáticas da região, enquanto a eficiência da maioria dos outros métodos de tratamento está associada às características do efluente a ser tratado. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar, preliminarmente, a instalação e o monitoramento de um sistema, em escala piloto, de tratamento de lixiviados de aterros sanitários utilizando a técnica de evaporação natural com o uso de painel evaporativo de elevada área superficial, em uma região de clima semiárido.

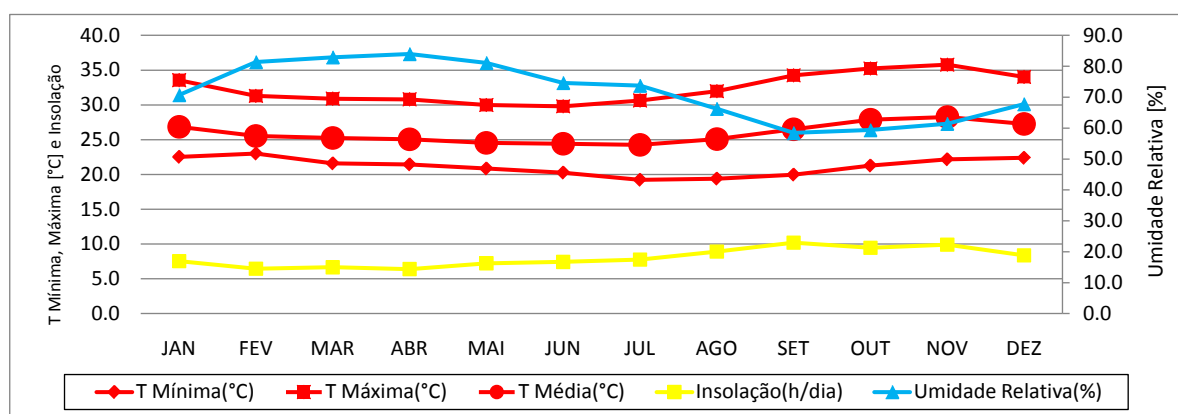
Um dos métodos tradicionais de evaporação de águas residuárias consiste em lagoas de evaporação natural. O tratamento de lixiviados em lagoas de evaporação consiste numa combinação do aquecimento solar e do vento para evaporar naturalmente o lixiviado. Este método requer uma grande área física, e o processo é lento (FINK *et al.*, 2001 apud JORGE, 2008). Entretanto, com o uso de painéis evaporativos associados a um clima semiárido, espera-se que o sistema seja bem mais eficiente, aumentando a taxa de evaporação e, consequentemente, reduzindo a área necessária para a instalação do mesmo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Local de estudo

A pesquisa foi realizada em uma área do IFCE - Campus Juazeiro do Norte. O município de Juazeiro do Norte com uma população de 249.936 habitantes (IBGE, 2010), localizado no extremo sul do Estado do Ceará, no chamado Vale do Cariri, distante cerca de 563 km de Fortaleza, fica na Messorregião Sul Cearense que se localiza entre os paralelos 060 46' 07'' a 070 51' 25'' latitude sul e 380 22' 09'' a 400 35' 59'' de longitude oeste e limita-se ao sul com o Estado de Pernambuco, ao oeste com o Piauí e ao leste com a Paraíba.

O referido município, de coordenadas geográficas 7° 12' 47'' S, 39° 18' 55'' WGr, está inserido em uma área de clima tropical quente semi-árido a tropical quente semi-árido brando, com período chuvoso de janeiro a maio, precipitação anual (média histórica) de 925,1 mm, altitude de 377,3 m e temperatura média de 24 a 26 °C (CEARÁ, 2010). Os dados apresentados na Figura 1 indicam que a temperatura máxima oscila entre 30°C e 35,8 °C, a média entre 24,3 à 28,2 e a mínima entre 19,2°C à 23°C, a insolação varia de 6,4 à 10,2 h/dia e a umidade relativa do ar varia de 58,4% à 84%.



Fonte: INMET, Estação de Barbalha-CE

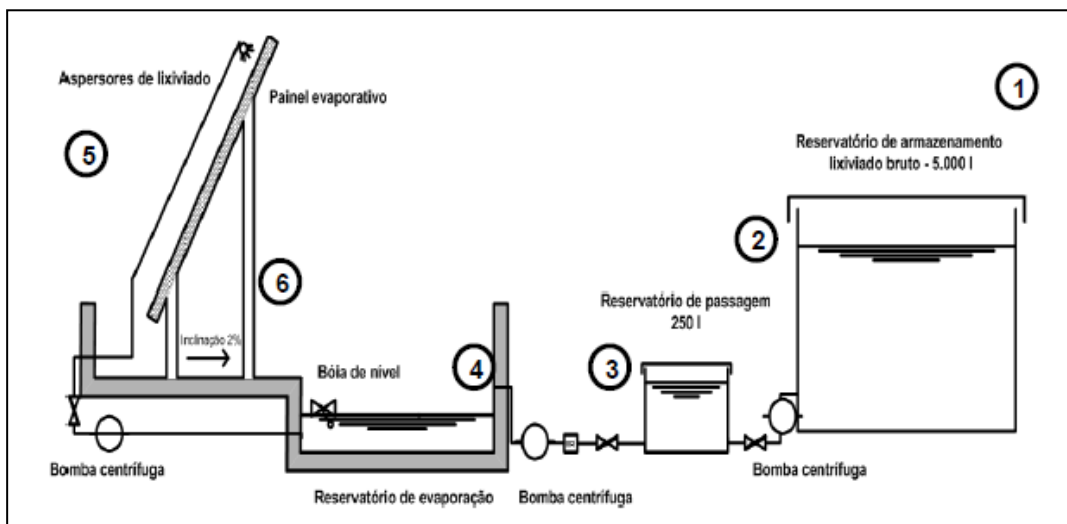
Figura 1: Médias mensais de variáveis climáticas para Juazeiro do Norte no período de 2005 a 2009.

### Piloto experimental

O piloto de campo em sistema aberto de evaporação por painéis foi montado com base no piloto desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos (LARESO) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), visando comparar os resultados obtidos no semiárido com os obtidos em Florianópolis, SC com condições climáticas bem distintas. Na Figura 2 observa-se o sistema de evaporação usando painel evaporativo instalado no IFCE - Campus Juazeiro do Norte, que foi adaptado do sistema utilizado por RANZI, *et al.* (2009) ilustrado na Figura 2.



Figura 2: Piloto experimental de evaporação no IFCE, Campus Juazeiro do Norte-CE.



**Figura 3: Esquema do piloto de tratamento de lixiviados por evaporação natural (RANZI, *et al*, 2009)**

A operação do experimento, considerando as indicações da Figura 3 e conforme RANZI, *et al*, (2009) é feita da seguinte forma: o lixiviado bruto proveniente do aterro sanitário é acondicionado no reservatório de armazenamento de 5.000 L (1). Uma bomba centrífuga é utilizada para alimentar o reservatório de passagem de 250 L, mantendo constante seu nível (2). O reservatório de passagem alimenta o reservatório (4) onde ocorre a evaporação do efluente. Conforme ocorre a redução de nível no tanque de evaporação a bóia aciona a bomba, que o reabastece. O hidrômetro (3) posicionado entre o reservatório de passagem e o reservatório de evaporação mede o volume de lixiviado enviado ao sistema. Do reservatório de evaporação o lixiviado é bombeado ao grupo de aspersores (5). Os aspersores, por sua vez, distribuem o lixiviado por toda a superfície do painel evaporativo (6) que é composto por uma placa alveolar em polipropileno, com dimensões de 1,0 x 3,5 x 0,3 m (base x altura x espessura) com elevada área específica. Devido à inclinação da placa (60°), uma parte do lixiviado percola por sua estrutura, onde ocorrerá a evaporação, e a parte excedente retorna, por gravidade, ao reservatório (4) para recirculação. O sistema é completamente automatizado. Os reservatórios de armazenamento de 250 e 5.000 L são caixas d'água de fibra de vidro comuns. No reservatório de 250 L foi colocado um filtro para reduzir o risco de obstrução dos aspersores e do painel de evaporação.

A área de contato é de grande relevância para a taxa de evaporação de um líquido, sendo que, segundo um princípio básico, nas reações físico-químicas quanto maior a superfície de contato entre os reagentes, maior a velocidade da reação. Assim sendo, para favorecer o processo de evaporação, deve-se aumentar a área de contato entre a água e o ar. Assim, se forem utilizadas estruturas de contato, isto é, materiais com elevada superfície exposta pode haver um incremento no volume de líquido evaporado. Estas superfícies de contato (como o painel de polipropileno utilizado neste trabalho) possuem uma estrutura alveolar, apresentando uma elevada área específica apesar de ocuparem volumes reduzidos. Nas superfícies de contato referidas anteriormente, a água é distribuída na parte superior de colméias ou mantas descendo por canais pré-formados ou aleatórios, molhando todo o meio. O ar atravessa transversalmente a colméia ou a manta, entrando em contato íntimo com o meio umedecido e absorvendo umidade até bem próximo da saturação (BASENGE, 2010). A placa foi colocada na direção do vento dominante e com um ângulo de 60° com a horizontal, valor indicado como ideal (Bondon *et al.*, 1994 e Duarte e Neto, 1996, *apud* CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2008) para a percolação do líquido e para que o vento incidente atinja toda a placa.

No caso do Piloto do IFCE os reservatórios 1 e 2 (Figura 1) foram instalados com uma diferença de nível de modo que a água passa por gravidade do 1 para o 2 e deste para o tanque de evaporação, eliminando duas (02) das três (03) bombas centrífugas do sistema (Figura 2). O preenchimento do tanque de evaporação foi feito inicialmente com água nas fases iniciais de testes e de ajuste da metodologia e permaneceu assim durante o período de tempo considerado neste trabalho, devido às dificuldades de acesso para coleta de lixiviado no lixão de Juazeiro do Norte – CE. No referido período, em decorrência das elevadas temperaturas, das baixas precipitações, da inexistência de área adequada para a contenção dos efluentes líquidos e das características da área de disposição dos RSU, não havia o acúmulo de lixiviado para a coleta em quantidade necessária à operação do sistema.



### Monitoramento e aquisição de dados

O monitoramento do experimento, feito diariamente, consiste em realizar as leituras do hidrômetro e verificar eventuais defeitos do sistema, incluindo o fluxo entre os reservatórios e o funcionamento da bomba e dos aspersores. Periodicamente são coletados os dados meteorológicos da estação do IFCE e solicitados os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), estação de Barbalha-CE. Os dados climáticos são fundamentais para se avaliar o processo de tratamento de efluentes líquidos por evaporação natural, sendo assim é necessário o monitoramento de alguns parâmetros. Os dados de temperatura, precipitação pluviométrica, velocidade do vento, umidade relativa do ar são fornecidos pela estação meteorológica que fica a 10 m do local onde está inserido o piloto objeto do presente estudo (Figura 2), enquanto os dados de radiação solar e evaporação natural são obtidos da estação do INMET, que se localiza à cerca de 12 km do experimento. Após a coleta dos dados é realizado o balanço hídrico do sistema levando-se em conta a evaporação do ambiente, a precipitação e a quantidade de efluente (no caso específico utilizamos água) introduzido no sistema de tratamento. Finalmente verifica-se a eficiência do piloto calculando-se a evaporação natural ( $E_N$ ), a contribuição do painel evaporativo ( $E_P$ ) e a evaporação total ( $E_T$ ) de acordo com as equações 1 e 2.

$$E_T = E_P + E_N \quad \text{equação (1)}$$

$$E_P = V_L - E_N + P \quad \text{equação (2)}$$

Sendo:

$V_L$  = Volume do efluente introduzido no sistema, medido diariamente através do hidrômetro;

$E_N$  = Evaporação natural, estimada através da evaporação obtida, diariamente, em Tanque Classe A;

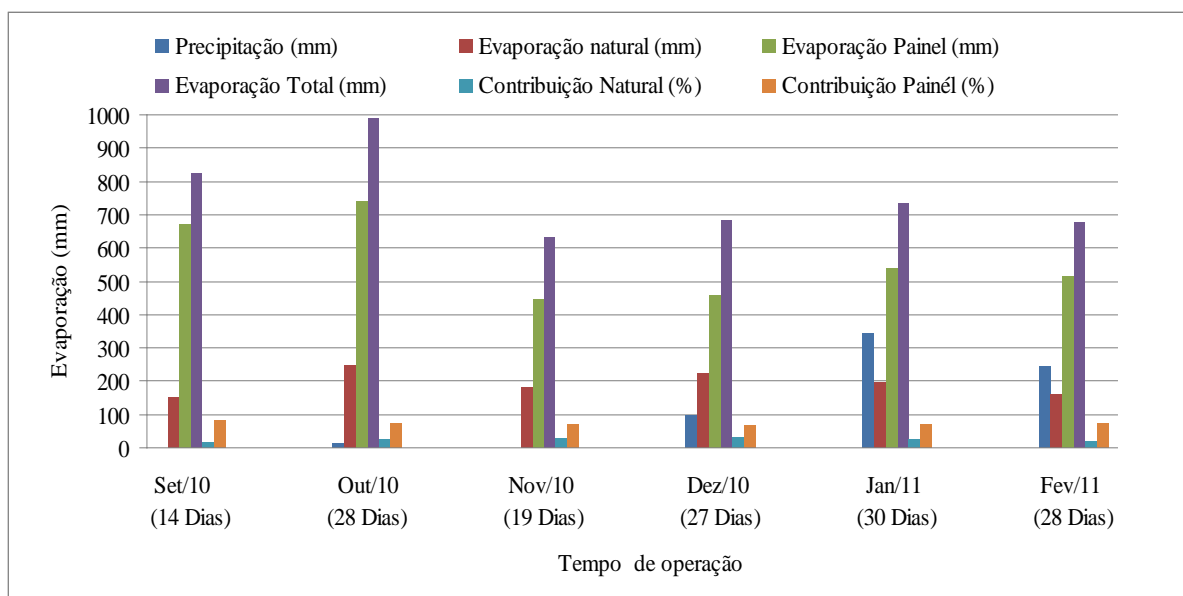
$P$  = Precipitação pluviométrica na forma de chuva, fornecida pela estação meteorológica.

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta os resultados da evaporação referente aos dias de monitoramento do piloto experimental no período de setembro de 2010 a fevereiro de 2011. Em números absolutos a evaporação total ( $E_T$ ) máxima, incluindo a evaporação natural ( $E_N$ ) e evaporação no painel ( $E_P$ ), foi observada no mês de outubro e a mínima em novembro. Entretanto, como é possível notar (Figura 4) o número de dias de operação do piloto não foi o mesmo em todos os meses. Assim, levando-se em conta a taxa média diária os valores obtidos para os meses de setembro, outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro foram, respectivamente, de 58,9; 35,4; 33,4; 25,3; 24,6 e 24,3 (mm/dia).

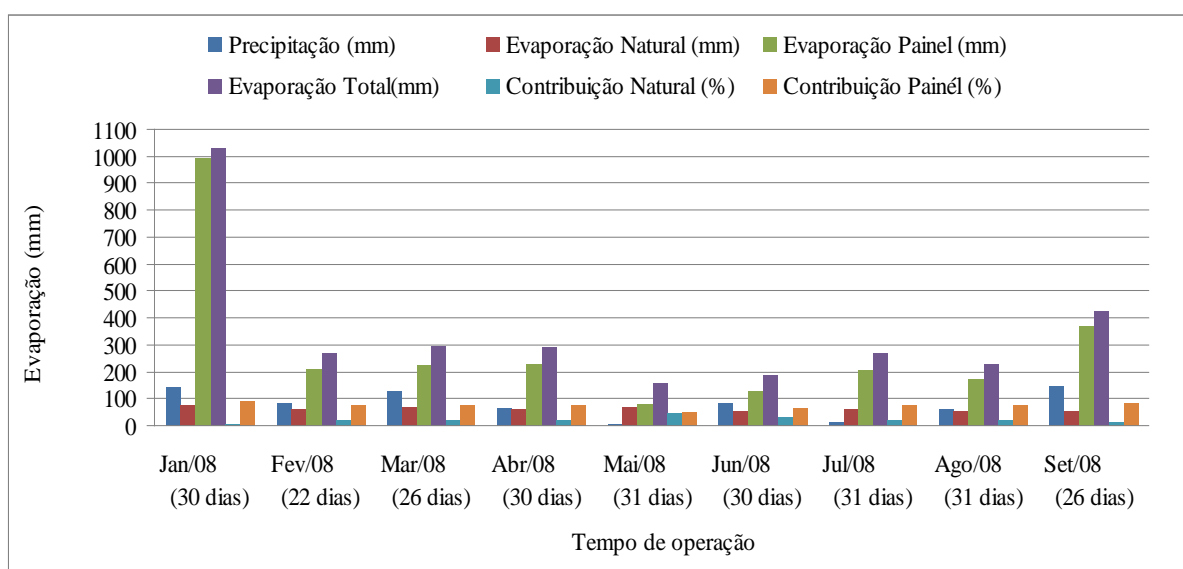
Esses valores estão relacionados às médias de algumas variáveis climáticas observadas no período de monitoramento do experimento. Nos meses de set/10, out/10 e nov/10, que correspondem às maiores taxas de evaporação, foram medidos as maiores temperaturas médias (26,8 °C a 28,8 °C), os menores valores de umidade relativa (50,5 % a 53,2 %) e os maiores valores de insolação (8 a 9,6 h/dia) do período de monitoramento. Esses valores estão coerentes com as médias climáticas da região. Considerando os dados de 2005 a 2009 (Figura 1), nos meses de setembro a novembro verificam-se elevados valores de insolação (em torno de 9,5 h/dia), altas temperaturas (máximas em torno de 35 °C e mínimas acima de 20 °C) e umidades do ar relativamente baixas (50 % - 60 %). Os menores valores observados em jan/11 e fev/11 correspondem aos períodos de elevadas precipitações (Figura 4), menores valores de temperaturas e insolação e maiores valores de umidade relativa do ar, observados durante o monitoramento.

A maior taxa de evaporação no sistema foi observada no mês de setembro com um rendimento de 58,8 mm/dia o que é muito superior aos demais meses, inclusive em relação à out/10 e nov/10 que apresentaram condições climáticas semelhantes. Sendo que em setembro não houve precipitação e a velocidade média dos ventos foi a maior registrada no período de estudo com 1,74 m/s e nos demais meses a velocidade ficou abaixo de 1,0 m/s. O vento influi na taxa de evaporação, mas com velocidade elevadas também possibilita que uma parte da água dos aspersores seja lançada fora do sistema. Portanto é provável que em setembro o valor da evaporação total tenha sido superestimado.



**Figura 4: Resultados da evaporação no sistema piloto em Juazeiro do Norte – CE.**

A Figura 05 exibe os resultados do monitoramento do Piloto Experimental operado em Florianópolis-SC durante nove meses, conforme dados apresentados por Ranzi et al (2009) e Ranzi (2009). Na referida figura observam-se que os valores da evaporação no referido experimento são bem inferiores àqueles observados em Juazeiro-CE. Nos meses de janeiro/08 a setembro/08 a evaporação média foi de 34,5; 12,3; 11,5; 9,8; 5,1; 6,3; 8,8; 7,4; 16,4 (mm/dia) respectivamente, representando um rendimento médio para o período (257 dias), de 12,3 mm/dia, enquanto o rendimento médio em Juazeiro, para 146 dias de operação do piloto, foi de 31,2 mm/dia. Mesmo considerando apenas os dias dos seis meses com os maiores valores de  $E_T$ , o rendimento médio em Florianópolis seria de apenas 15,7 mm/dia, ou seja, praticamente a metade do observado em Juazeiro.



**Figura 5: Resultados da evaporação do piloto operado em Florianópolis – SC (Fonte: RANZI, et al., 2009)**

Em Florianópolis, segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo Cf e a variedade específica Cfa, ou seja, clima mesotérmico úmido, com chuvas bem distribuídas em todo o ano. A temperatura média é de 20,3 °C, sendo fevereiro o mês mais quente com a média mensal de 24,3 °C e julho o mês mais frio, com uma média de 16,5 °C. Quanto à umidade, a média anual fica em torno de 82 %, a média mensal mínima é de 80% em novembro e dezembro e a máxima de 84% em julho (GOLUART, 1993).

Durante a operação do piloto em Florianópolis as principais variáveis que interferem no processo de evaporação como temperatura média, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar oscilaram entre 17,9 °C - 25,0 °C, 73 % - 80 %, 0,87 m/s - 1,89 m/s e 131 W/m<sup>2</sup>.dia - 254 W/m<sup>2</sup>.dia, respectivamente (RANZI, 2009). Em Juazeiro para as mesmas variáveis, foram observados valores nos seguintes intervalos: 24,8 °C - 28,8 °C, 51 % - 84 %, 0,5 m/s - 1,72 m/s (Figuras 6 e 7) e 225 W/m<sup>2</sup>.dia - 345 W/m<sup>2</sup>.dia. Das variáveis medidas, apenas a velocidade do vento apresentou valores mais favoráveis a evaporação em Florianópolis. Em relação à umidade relativa do ar, embora o valor máximo tenha atingido 84 % em Juazeiro, nos 04 primeiros meses ficou entre 50 % e 68 % ou seja, em condições bem mais favoráveis à evaporação do que o observado em Santa Catarina. Portanto o clima e as variáveis climáticas medidas justificam as diferenças observadas na E<sub>T</sub> média (mm/dia) dos experimentos de Florianópolis e de Juazeiro do Norte.

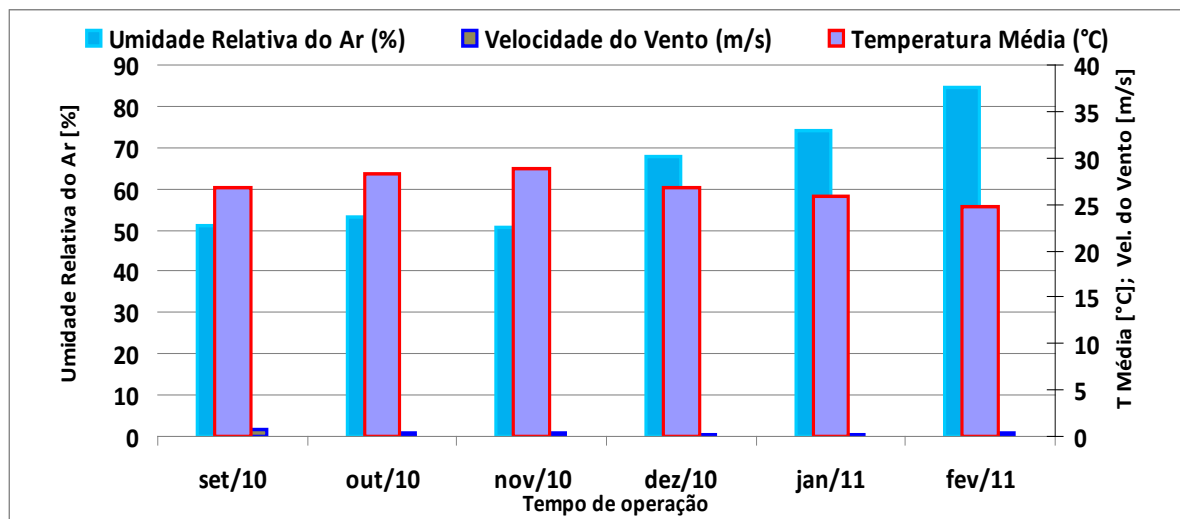


Figura 6: Variáveis climáticas medidas durante o monitoramento do piloto operado em Juazeiro-CE

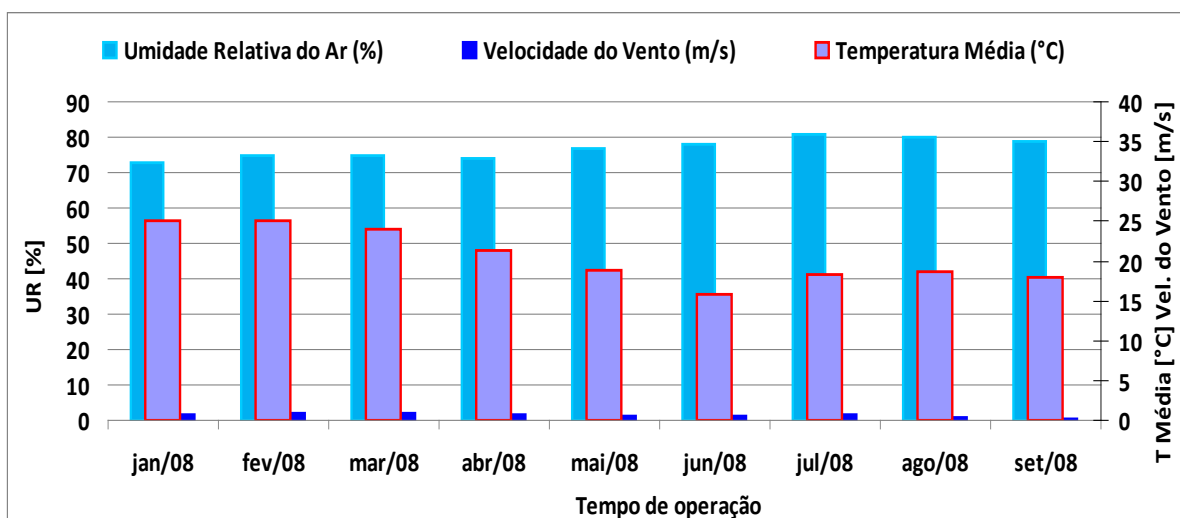
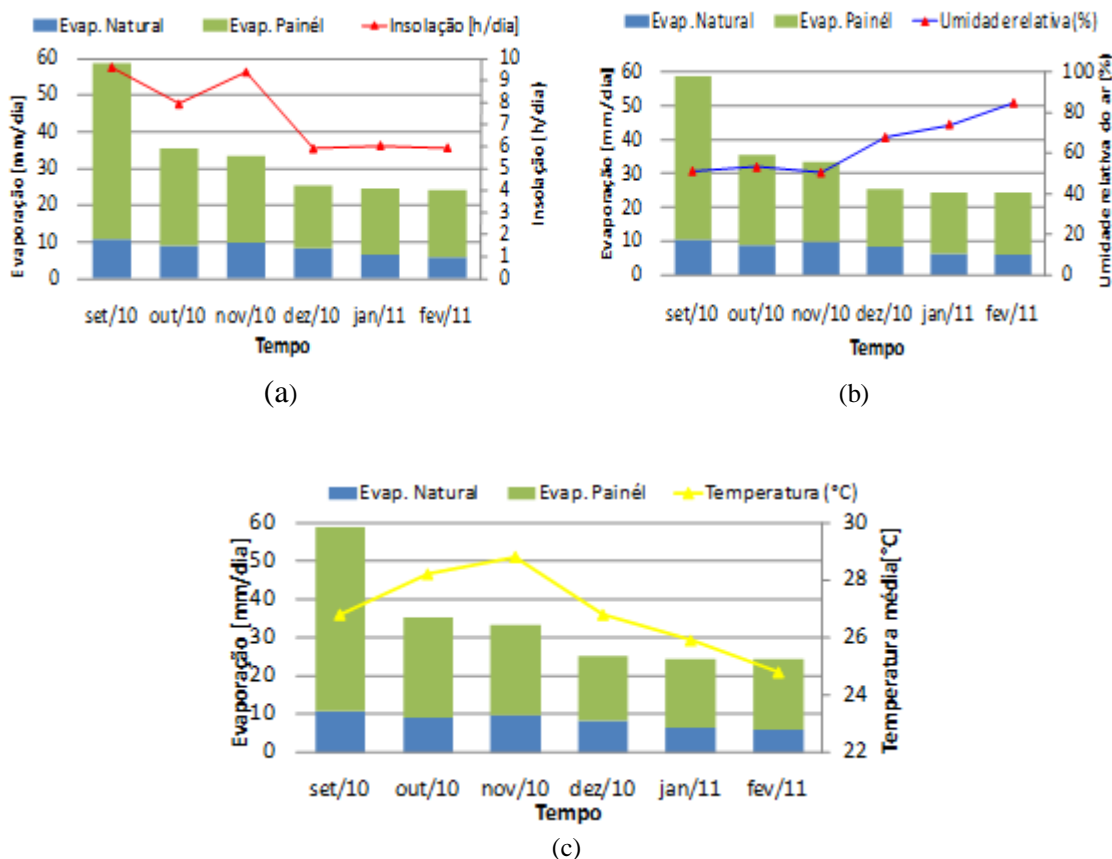


Figura 7: Variáveis climáticas medidas durante o monitoramento do piloto operado em Florianópolis – SC (Fonte: RANZI, *et al.*, 2009)

Nas Figuras 4 e 5 verificam-se, mês a mês, as contribuições do painel na evaporação total. Nota-se que a distribuição entre a evaporação natural e aquela atribuída ao painel não é uniforme ao longo do tempo. Ranzi (2009) observou que nos meses mais quentes, onde a temperatura do ar e a radiação solar são maiores, o painel é responsável por uma maior parcela da evaporação no sistema, enquanto nos meses com as características climáticas mais desfavoráveis, o painel tem rendimento menor. Em Juazeiro, como o comportamento das variáveis climáticas foi bem diferente, não se observou essa tendência e a contribuição percentual do painel foi relativamente menor. Para os 146 dias de operação do piloto (Figura 4), 74 % da evaporação total acumulada é atribuída ao painel do sistema, enquanto a parcela da evaporação natural corresponde a 26 %. Em

Florianópolis (Figura 5) essas contribuições, no período acumulado de 257 dias, foram de 82 % para o painel e 18 % para a evaporação natural.

A Figura 8 apresenta o comportamento de variáveis climáticas (considerando os valores médios referentes aos dias de operação do piloto em cada mês) e da evaporação total em Juazeiro do Norte, com destaque para as contribuições do painel e da evaporação natural. Nota-se, em geral, que o total evaporado está relacionado com o aumento ou a diminuição dos valores de alguns parâmetros, entretanto não é possível perceber isso mês a mês uma vez que as variáveis envolvidas no processo de evaporação nem sempre oscilam na mesma direção, ou seja, favorecendo ou não a evaporação.



**Figura 8: Evaporação média (mm/dia) x valores médios de insolação (a), umidade relativa (b) e temperatura (c), medidos no experimento de Juazeiro do Norte.**

## CONCLUSÕES

Os resultados preliminares obtidos no semiárido (Setembro/2010 a Fevereiro/2011), em comparação com os dados obtidos por RANZI et. al. (2009) em clima subtropical úmido (Janeiro a Setembro/2008), indicam uma evaporação média diária 2,5 vezes maior, o que confirma o potencial de utilização de energia solar para o tratamento de lixiviados de aterro sanitário e, possivelmente, de outros tipos de efluentes em regiões de clima semiárido. No piloto instalado em Juazeiro a evaporação total do sistema foi de 40,97 m<sup>3</sup>, o que equivale a uma evaporação total média de 280,6 L/dia, considerando os 146 dias de operação do experimento. Do volume total evaporado no período, 28,23 m<sup>3</sup> representaria a efetiva eliminação do lixiviado (nessa fase inicial foi utilizado água) o restante (12,74 m<sup>3</sup>) se refere à evaporação da chuva captada no sistema. Assim, a evaporação do efluente no sistema apresentaria um rendimento médio de aproximadamente 193,4 L/dia. A parcela da E<sub>T</sub> referente ao painel foi de 30,40 m<sup>3</sup>, portanto a evaporação diária por área de painel (3,5 m<sup>2</sup>) foi de, aproximadamente, 60 litros/m<sup>2</sup>. No piloto de Florianópolis durante os 257 dias de monitoramento a evaporação total média foi de aproximadamente 111 L/dia, com um rendimento médio de evaporação do lixiviado de aproximadamente 58 L/dia e uma evaporação média diária de aproximadamente 26 litros/m<sup>2</sup> de painel. Dessa forma, como o volume de precipitação captado pelo sistema em Juazeiro foi bem inferior ao volume observado



em Florianópolis o rendimento líquido do sistema no semiárido, considerando o período analisado, foi 3,3 vezes maior.

## AGRADECIMENTOS

À Bianca Ranzi e Marcelo Seleme Matias pelo repasse de informações sobre a construção e o monitoramento do Piloto Experimental da UFSC e pelo auxílio na instalação do experimento em Juazeiro do Norte-CE.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelos recursos financeiros para a construção e operação do experimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALCÂNTARA, P.B.. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. Tese (doutorado) Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2007.
2. BASENGE TERMODINÂMICA. **Resfriamento Evaporativo do Ar**. Disponível em: <<http://www.basenge.com.br/pagina1a.html>>. Acesso em: Dezembro 2010
3. BONDON, D., CRABOS, J.L., PIETRASANTA, Y., SAMBUCCO, J.P. **Traitement des Rejets Vinicoles par un Procédé Innovant: «l'Evaporation Forcée»**. Congrès International sur le Traitement des Effluents Vinicoles: Actes du Colloque, 1994. ISBN 2-85362-366-1. CEMAGREF.
4. CASTILHOS JUNIOR, A. R . **Avaliação Regionalizada de Tratamento de Lixiviados de Aterros Sanitários via Processos Evaporativos por Radiação Solar**. Projeto de Pesquisa MCT/CNPq. 30p, 2008.
5. CEARÁ, Secretaria do Planejamento e Gestão (SEPLAG), Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará ( IPECE) **PERFIL BÁSICO MUNICIPAL - Juazeiro do Norte**, Fortaleza-CE, 2010.
6. DUARTE, E.A., NETO, I. Evaporation Phenomenon as a Waste Management Technology. **Water Science Technology**, Vol.33, N. 8, pp.53-61. 1996. Elsevier Science Ltd.
7. FINK, R. G., Hart, J. . **Pollution Engineering, Wastewater Evaporation 101**. Ano 2001
8. **GAPLAN, Atlas de Santa Catarina**. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. Aero foto Cruzeiro, Rio de Janeiro, 1986.
9. GOMES, L. P. (Coord). **Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 360 p.
10. GOULART, S. V.G. **Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações em Florianópolis** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina--UFSC, Florianópolis Setembro de 1993.
11. HILGER, H. H.; BARLAZ, M. A. **Anaerobic decomposition of refuse in landfills and methane oxidation in landfill cover soils**. In: HURST, C. J. (ed). Manual of environmental microbiology. Washington : ASTM Press, 2002. p. 696-718
12. JORGE, J. A. S. de C., **Análise Em Instalação Piloto Da Dispersão De microrganismos, Compostos Orgânicos Voláteis E Aspectos Toxicológicos No Tratamento De Lixiviados De Aterros Sanitários**. Dissertação de Mestrado – Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa - Portugal, 2008.
13. MENDONÇA, F., Danni-Oliveira, I. M., **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. Ed: Oficina de Textos, São Paulo, 2007.
14. MOLLE, F. **Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes**. Série Brasil. SUDENE. Hidrologia. Recife, série.25, 1989.
15. QUASIM, S.R; CHIANG,W. **Sanitary Landfill leachate**. Lancaster : Technomic Publishing Company, 1994.
16. RANZI, B, D. **Tratamento de lixiviados de aterro sanitário por evaporação natural com painéis - estudo em escala piloto**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina Florianopolis, SC, 2009. 107 f.
17. RANZI, B, D.; CASTILHOS JUNIOR, A. R; BURIGO, S. D. **Tratamento de lixiviados de aterro sanitário por evaporação natural com painéis**. In: 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Recife – PE, 2009.

19. SILVA, M. G DA., OLIVEIRA, J. B DE., LEDO, E. R .F., ARAÚJO, E.M., ARAÚJO, E.M., **ESTIMATIVA DA  $ET_0$  PELOS MÉTODOS DE PENMAN-MONTEITH E HARGREAVES-SAMANI A PARTIR DA  $T_x$  E  $T_n$  PARA JUAZEIRO DO NORTE-CE.** II Congresso Cearense de Agroecologia-Universidade Federal do Cariri- UFC, Juazeiro do Norte-CE, Novembro 2010.