

CIRCULAÇÃO MICROCLIMÁTICA ENTRE SUPERFÍCIE, GRANDES DOLINAS E CAVERNAS NO CARSTE DE SÃO DESIDÉRIO, BAHIA

Microclimatic circulation between surface, huge dolines and caves in the karst of São Desidério, Bahia state (Northeast of Brazil)

Heros Augusto Santos Lobo

Prof. Adjunto, Depto. de Geografia, Turismo e Humanidades, UFSCar, Campus Sorocaba
heroslobo@ufscar.br

Artigo recebido em 11/08/2012 e aceito para publicação em 29/01/2013

RESUMO: Os estudos de microclima, especificamente em cavernas, são recentes no Brasil, tendo sido desenvolvidos de forma mais sistemática nas últimas três décadas, com predominância em cavernas turísticas. O presente estudo se insere em uma linha já estabelecida mundialmente do estudo do espeleoclima, mas ainda pouco desenvolvida no Brasil, a classificação dos padrões de circulação atmosférica em dolinas e cavernas. Para tanto, foi realizado um monitoramento higratérmico durante o inverno, que buscou detalhar a dinâmica de troca gasosa entre o microclima de superfície, grandes dolinas e cavernas em seu interior, em São Desidério, Bahia. Para a pesquisa de campo, foram selecionadas duas dolinas, com cavidades de tamanhos distintos em seu interior, para verificação de possíveis padrões, semelhanças e singularidades. Os resultados demonstraram que as dolinas e suas respectivas cavernas correspondem ao modelo de circulação atmosférica de cavernas conhecido como armadilha para a captura do ar frio, conservando a temperatura em seu interior relativamente mais fria e o ar mais úmido que o microclima quente e seco da região de São Desidério, mesmo na época de estiagem. As conclusões apontam necessidades de estudos complementares no período do verão, bem como considerações sobre o potencial favorável de uso turístico das cavernas no fundo das dolinas, sob a ótica do espeleoclima.

Palavras-chave: Atmosfera Cavernícola; Espeleoclima; Microclima; Monitoramento Climático.

ABSTRACT: The research of microclimate in caves is recent in Brazil, and has been developed in a systematic basis only in the last three decades, mainly in show caves. The present study is aligned to a worldwide established research line, the classification of the patterns of air flow in dolines and caves. For this reason, a hydro-thermal monitoring was carried out during the winter, aiming to detail the dynamic of the air exchange between the microclimate in the surface, huge dolines with caves inside, in the municipality of São Desidério, in the State of Bahia. The field research was developed into two dolines with different sizes of caves in the inner part, to verify possible patterns, similarities and singularities. The results show that the dolines, and its respective caves, correspond to the model of air flow in caves named cold trap, keeping the temperature relatively cool and the air wetter inside in comparison to the warm and dry microclimate of the São Desidério region, even in the dry season. The conclusions point out the necessity of complementary researches in the summer, as well as considerations about the favorable potential of tourist use of the caves in the inner part of dolines in São Desidério, from the perspective of the speleoclimate.

Keywords: Cave Atmosphere; Espeleoclimate; Microclimate; Climate monitoring.

INTRODUÇÃO

Os estudos do espeleoclima vêm sendo amplamente utilizados em diversas cavernas do mundo com objetivos como: o estudo da dinâmica da atmosfera subterrânea; as pesquisas de paleoambientes e de modelagem climática para fins de compreensão do aquecimento global atual; e para o manejo sustentável do espeleoturismo (LOBO, 2012). No Brasil, os estudos espeleoclimáticos ainda são poucos, se tratando de um campo recente de investigações e com amplas possibilidades de expansão. Dos trabalhos mais extensos e consistentes já executados no país, destacam-se o de Boggiani et al. (2007); e Lobo (2011). De um modo geral, predominam nestes estudos a caracterização descritiva das variáveis pesquisadas e, em alguns casos (e.g. BOGGIANI et al., 2007), a sua correlação com a presença de pessoas para fins de análise de impacto da visitação turística em cavernas. Lobo (2011) enfocou também na interpretação da dinâmica de circulação atmosférica no ambiente, primordial para as constatações posteriores acerca de eventuais impactos da visitação, pois além da percepção e análise da estabilização dos parâmetros aferidos para a identificação da intensidade de impactos no ambiente, é preciso conhecer quais os fluxos preferenciais e tendências da atmosfera subterrânea – dispersiva ou cumulativa.

Nesse contexto, foi realizada uma pesquisa com o objetivo de estabelecer uma análise da dinâmica de troca atmosférica entre o microclima de superfície, as grandes dolinas e a porção proximal das cavernas localizadas em seu interior no sistema cárstico do rio João Rodrigues, em São Desidério, Oeste baiano. O estudo permitiu também a construção de uma linha de base acerca do conhecimento da atmosfera subterrânea (espeleoclima) destas duas cavernas, para subsidiar futuros estudos focados em sua capacidade de carga turística.

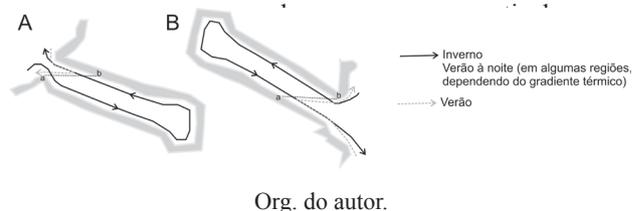
REFERENCIAL TEÓRICO

A atmosfera das cavernas é marcada por singularidades que a diferenciam dos demais sistemas atmosféricos, em função de fatores como o confinamento espacial, a ausência de luz e a baixa incidência de energia solar direta (CIGNA, 2004). Lobo (2012)

explica que sua análise é feita com base no monitoramento contínuo da temperatura do ar, das rochas e da água, a umidade relativa do ar, a pressão atmosférica, os fluxos de água e de ar, as taxas de concentração de CO₂ e a condensação nas paredes, teto e espeleotemas (e.g. MANGIN; ANDRIEUX, 1988; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006; LUETSCHER; JEANNIN, 2004). Os principais fatores que interferem na variabilidade destes elementos são o confinamento espacial, a estratificação vertical, a movimentação relativamente pequena de massa e energia, a menor disponibilidade ou ausência total de luz e a estabilidade relativa dos parâmetros físico-químicos, que são proporcionais ao confinamento espacial, à profundidade e distância do meio externo e ao número e posição dos acessos ao ambiente externo (BAILEY, 2005; BADINO, 2009).

A estabilidade do espeleoclima e a circulação de ar no interior de uma caverna dependem também das dimensões do sistema subterrâneo, da movimentação do ar por efeito barométrico e da complexidade dos possíveis níveis de galerias existentes. A Figura 1 ilustra dois dos principais modelos conceituais de circulação de ar em cavernas.

Figura 1. Modelo conceitual baseado em Mangin e Andrieux (1988) e Cigna (2004),



Org. do autor.

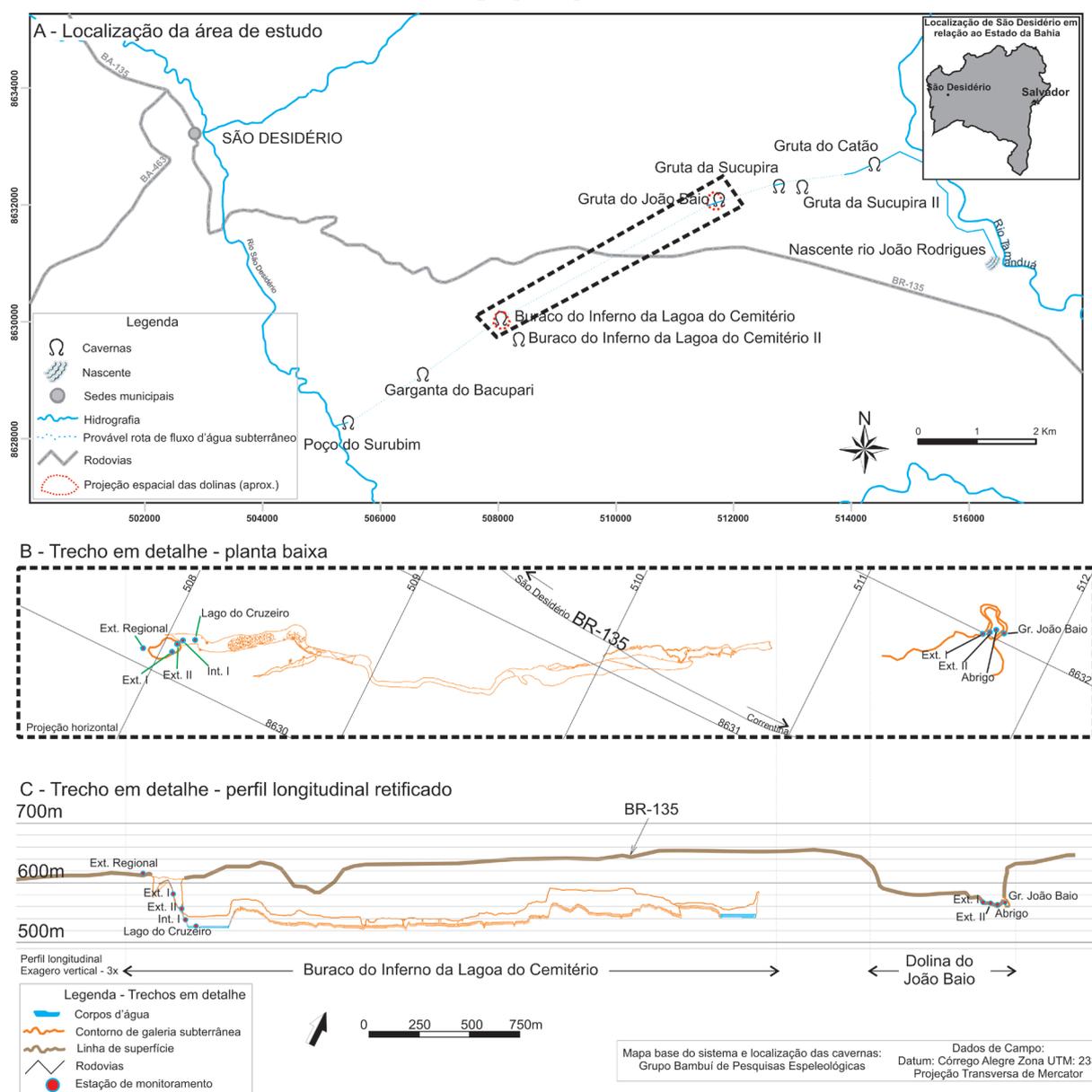
A Figura 1 apresenta em cortes transversais diferentes padrões de circulação atmosférica subterrânea, para as cavernas que são classificadas como “sacos de ar”, ou mesmo “armadilhas para a captura do ar”, em livres traduções dos termos *réserve d'air* do francês (MANGIN; ANDRIEUX, 1988) e *trap* do inglês (CIGNA, 2004). A diferença, nestes casos, é a posição predominante da caverna em relação ao eixo horizontal. Se a caverna se desenvolve para baixo (1A) ela se configura como uma armadilha para a captura de ar frio (*réserve d'air froid; cold trap*). Quando este desenvolvimento é para cima (1B), o aprisionamento que ocorre é de ar relativamente mais quente (*réserve d'air chaud; warm trap*).

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

A presente pesquisa foi desenvolvida no sistema cárstico do rio João Rodrigues, município de São Desidério, Oeste baiano (Figs. 2a, b; 3). A região está inserida na interface do afloramento dos arenitos do Grupo Urucuaia com os carbonatos da Formação São

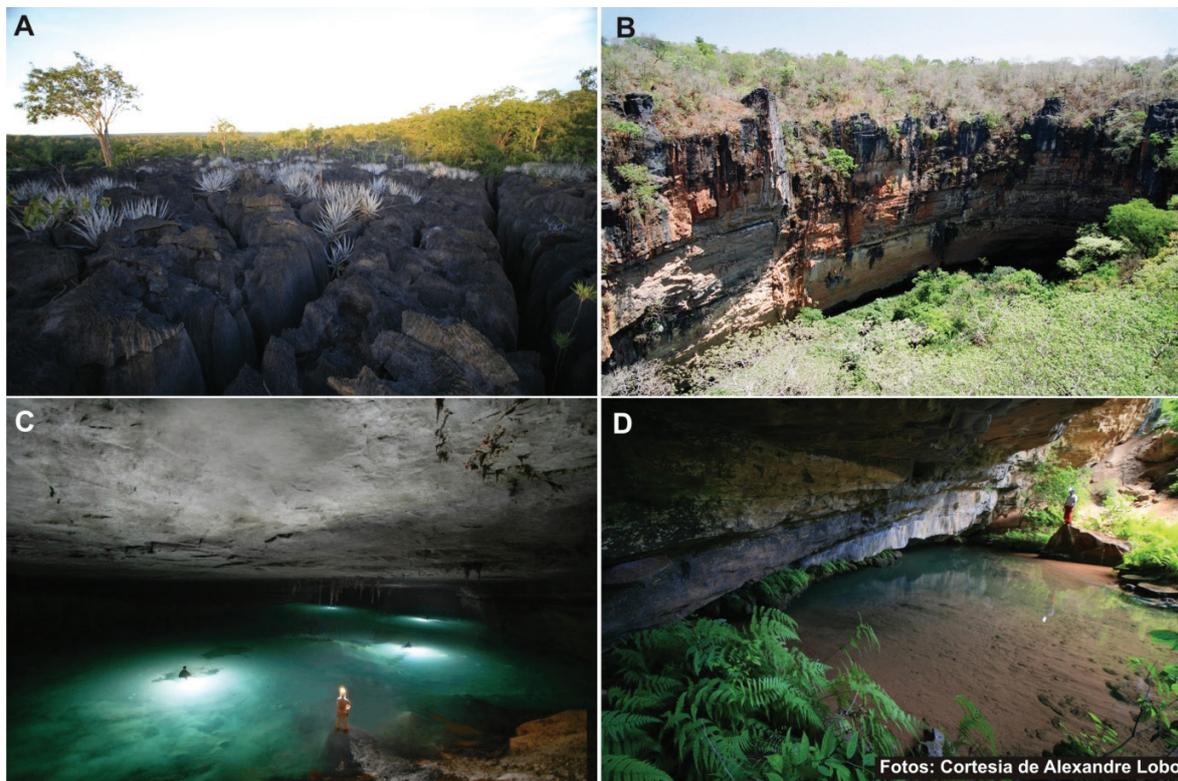
Desidério do Grupo Bambuí (CAMPOS; DARDENNE, 1997). Trata-se de um típico relevo cárstico, com grande concentração de cavernas e destaque para os grandes volumes subterrâneos e na zona de transição subsuperficial, gerados por dolinamentos e salões de abatimento.

Figura 2. Localização da área de pesquisa e posição das estações de monitoramento.



Org. do autor.

Figura 3. O carste da região do rio João Rodrigues, São Desidério-BA.



A) paisagem local, com afloramentos rochosos e pouca vegetação; B) grandes dolinas – que na região recebem também o nome de “buraco do inferno” –, formadas pelo colapso de rochas, como na dolina da Sucupira; C) Lago do Cruzeiro, provavelmente o maior lago subterrâneo da América do Sul, no interior do buraco do inferno da Lagoa do Cemitério (um dos lugares estudados); D) Ressurgência do João Baio, em dolina homônima, uma das poucas ocorrências mundiais conhecidas de sifão cárstico intermitente (outro lugar estudado nesta pesquisa).

O clima da região oeste da Bahia, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, um clima tropical com inverno seco. O regime das chuvas é bem definido, com um verão chuvoso entre outubro e abril e um inverno seco entre maio e setembro. As médias de temperatura variam entre 20 °C e 26 °C, com máximas de 42 °C e mínimas de 13,3 °C. A umidade relativa do ar varia entre 50% e 80%. A precipitação média anual para a região de Barreiras – onde São Desidério está incluído – é da ordem de 900 a 1000 mm, mas distribuída de forma bastante irregular. No período chuvoso, as médias mensais chegam a 250 mm, quase 25% do total para o ano, e tendendo à zero no período seco (GASPAR, 2006).

Conforme dados do INEMA (2012), durante o período de monitoramento realizado (julho-outubro/2011) houve grande estiagem na região, sem nenhum registro de chuvas para os meses de julho, agosto e setembro.

MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo foram realizados monitoramentos contínuos da temperatura e umidade relativa do ar, bem como o monitoramento da temperatura da água no lago do Cruzeiro (no interior do buraco do inferno da Lagoa do Cemitério) e no lago do Sifão (no interior da gruta do João Baio). Das 10 estações de monitoramento instaladas, apenas aquela instalada no lago do Sifão não funcionou. A posição relativa das outras nove estações é representada na Figura 2 (B e C). O intervalo de coleta e registro de dados foi de 30 minutos, durante todo o período.

O monitoramento foi realizado entre os dias 15/julho e 25/outubro de 2011, totalizando 103 dias. Exceção deve ser feita à estação Lago do Cruzeiro, que deixou de registrar os dados a partir do dia 5 de outubro. Para a execução do monitoramento higr-

térmico foram utilizados termohigrômetros da marca Testo, com acurácia de 0,2 °C para temperatura e 2% para umidade relativa do ar, e capacidade de armazenamento de dados variável entre 16.000 e 2 milhões de registros – variável conforme o modelo de instrumento utilizado.

A delimitação do estudo considerou a necessidade da compreensão das trocas atmosféricas entre a zona termoclimática externa e a zona transicional (cf. classificação de LOBO et al., 2009). No caso do sistema cárstico João Rodrigues, a sua conformação fisiográfica – cavidades naturais no fundo de grandes dolinas de abatimento – permitiu e suscitou a necessidade de uma compreensão da troca gasosa entre a superfície, o transecto vertical e a cavidade ao fundo (Figura 2C, em perfil longitudinal das cavidades pesquisadas), de forma a permitir a interpretação da estratificação vertical da variabilidade espeleoclimática (cf. LUETSCHER; JEANNIN, 2004; BOURGES et al., 2006), o que no caso específico em questão, é fundamental para a compreensão do sistema atmosférico subterrâneo.

O primeiro conjunto de análises aplicado foi a estatística descritiva. Por meio dela, foram obtidas as medidas de tendência central e de variabilidade para cada série de dados. Este procedimento permitiu uma primeira compreensão do sistema atmosférico estudado, bem como a obtenção das simplificações necessárias para as análises estatísticas subsequentes.

A análise dos parâmetros espeleoclimáticos foi realizada também por meio de procedimentos estatísticos específicos para séries temporais. Este tipo de análise é bastante usual tanto em trabalhos de hidrogeologia (e.g. LAROCQUE et al., 1998) quanto de climatologia (e.g. CALAFORRA et al., 2003; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006).

As análises estatísticas de séries temporais foram realizadas por meio de duas funções temporais: a autocorrelação e a densidade espectral. No caso estudado, as séries obtidas são de curto termo (cf. MANGIN, 1984), inferiores a um ano. Desta forma, o efeito memória é identificado quando o resultado da função de autocorrelação atinge o índice de 0,2 (MANGIN, 1984). A autocorrelação foi complementada pela função de densidade espectral. Esta corresponde a uma transformação do domínio do tempo para o domínio

da frequência, por meio da transformada de Fourier da função de autocorrelação (LAROCQUE et al., 1998).

Posteriormente, a análise dos dados foi aplicada visando a integração das variáveis analisadas entre as diversas estações de monitoramento, por meio dos coeficientes de correlação r de Pearson, já utilizado anteriormente para análises de dados espeleoclimáticos, em trabalhos como: Freitas e Schmekal (2003) e Lobo (2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De um modo geral, os dados atmosféricos registrados são representativos para o período de estiagem na região. Durante o monitoramento (15/jul. a 25/out.), o primeiro registro de chuva ocorreu no dia 4 de outubro, com um acumulado diário de 105 mm, seguido por chuvas diárias menores nos dias subsequentes, entre 0,25 mm e 5,25 mm (INEMA, 2012). Esta constatação é importante para que os limites de interpretação e eventuais comparações futuras sejam previamente traçados, evitando generalizações. As variações registradas para a temperatura e umidade relativa do ar, visando a caracterização do microclima local, são apresentadas em conjunto com os dados do buraco do inferno da Lagoa do Cemitério.

Buraco do inferno da Lagoa do Cemitério

Para o buraco do inferno da Lagoa do Cemitério foram consideradas cinco estações de monitoramento higrotérmico: Externa Regional; Externa I; Externa II; Interna I e Lago do Cruzeiro (Tabela 1).

Tabela 1. Estatística descritiva da temperatura e umidade relativa do ar na região do buraco do inferno da Lagoa do Cemitério.

Medida	Buraco do inferno da Lagoa do Cemitério										
	Externa Regional		Externa I		Externa II		Interna I		Interna II		
	UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. ar (°C)	T. ág. (°C)
Máxima	100,0	42,1	100,0	36,1	99,9	25,7	100,0	25,1	100	24,6	25,6
Média	51,9	24,3	56,3	23,2	79,2	19,5	99,7	22,6	99,6	22,9	24,6
Moda	99,9	21,3	48,3	22,4	99,9	19,7	99,9	22,4	99,9	22,9	24,8
Mínima	9,1	10,0	13,2	11,8	37,5	12,4	86,7	19,6	94	21,3	24,1
Ampli-tude	90,9	32,1	86,8	24,3	62,4	13,3	13,3	5,5	6	3,3	1,5
Desvio padrão	23,2	6,94	19,1	5,0	13,8	2,4	1,1	1,0	1,0	0,6	0,3

Legenda: UR = umidade relativa do ar; T = temperatura; T. ar = temperatura do ar; T. ág. = temperatura da água.

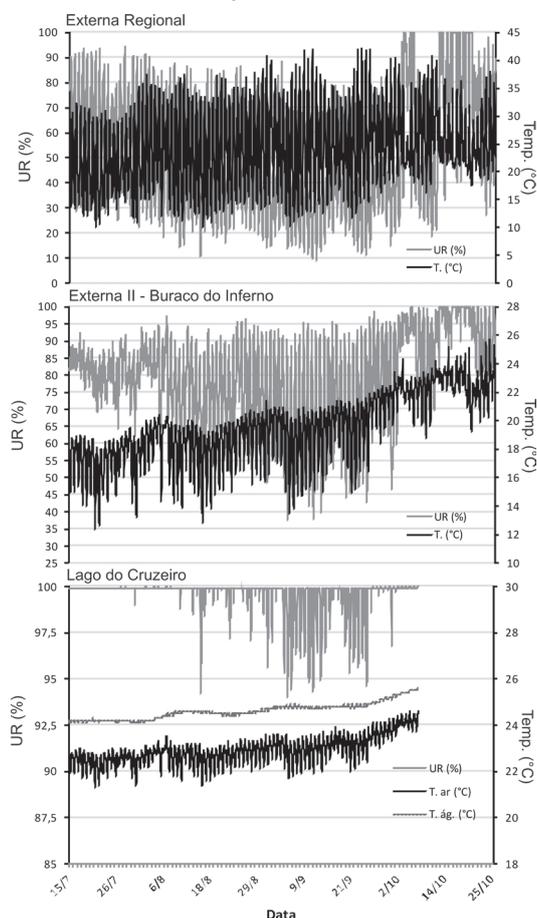
Org. do autor.

Com base nos dados da estação Externa Regional, a temperatura do ar (Tab. 1) no período aferido variou entre 10 °C (16 de agosto de 2011, às 5h 30min) e 42,1 °C (23 de setembro de 2011, às 13h 30min), com amplitudes da ordem de 20-25 °C no ciclo diurno. A média da temperatura do ar foi de 24,3 °C. Os valores extremos vão sendo atenuados à medida que se avança para o fundo da dolina, em direção à caverna. A amplitude vai diminuindo principalmente nas temperaturas mais elevadas, mas também nas temperaturas mais baixas. A Tab. 1 evidencia também uma variação nas medidas de tendência central da estação Externa II, localizada no fundo da dolina, em abrigo natural ventilado, próximo ao acesso para a caverna. Sua média e moda (19,53 °C e 19,7 °C, respectivamente) são inferiores às estações subjacentes acima (Externa I; média: 23,2 °C; moda: 22,4 °C) e abaixo (Interna I; média: 22,61 °C; moda: 22,4 °C), denotando comportamento atmosférico de baixo padrão cumulativo e elevada circulação de ar. É possível que a temperatura da rocha – que não foi aferida – possa influenciar neste padrão, tal como já concluído em trabalhos anteriores (e.g. LUETSCHER; JEANNIN, 2004). Sobre a umidade relativa do ar, ela tende aos níveis de saturação máxima (100%) à medida que se avança às zonas mais profundas da dolina e do interior da caverna, se aproximando também do extenso corpo d'água em seu interior. Todavia, chamam a atenção

os valores mínimos atingidos na estação Externa Regional (9,1%) e Externa I (13,2%), por serem padrões típicos de umidade de regiões semi-áridas, sobretudo quando associadas às temperaturas mais elevadas, como é o caso.

De um modo geral, a umidade relativa do ar variou em proporção inversa à temperatura (válido para todas as estações monitoradas), com mínima de 9,1% (12 de setembro de 2011, às 15h00min), média de 51,8% e máxima de 100% (diversos períodos entre 15 e 19 de outubro de 2011) na estação Externa Regional. Por outro lado, apresenta valores mais estáveis próximos aos níveis de saturação (100%) nas estações internas, onde a insolação é menor ou mesmo ausente. A correlação visual entre as variações da temperatura e umidade relativa do ar nas estações monitoradas é evidente, tal como se observa nos exemplos da Fig. 4. Os coeficientes de correlação *r* de Pearson apresentados na Tab. 2 corroboram esta interpretação.

Figura 4. Variação de temperatura e umidade relativa do ar nas estações Externa Regional, Externa II (Buraco do inferno) e Lago do Cruzeiro, entre 15 de julho e 25 de outubro de 2011



Org. do autor.

Tabela 2. Coeficientes de correlação r de Pearson entre as séries de dados das estações de monitoramento da região do buraco do inferno da Lagoa do Cemitério

	Ext.Reg.	Ext.I	Ext.II	Int.I	Int.II_Ar	Int.II_Ág.
Ext.Reg.	1	0,935	0,662	0,644	0,619	0,229
Ext.I		1	0,781	0,732	0,737	0,348
Ext.II			1	0,881	0,962	0,669
Int.I				1	0,874	0,452
Int.II_Ar					1	0,773
Int.II_Ág.						1

Legenda: Ext.Reg. = externa regional; Ext.I = externa I; Ext.II = externa II; Int.I = interna I; int.II_Ar = interna II ar; int.II_Ág. = interna II água.

Org. do autor.

Os coeficientes de correlação da Tab. 2 demonstram que as influências da temperatura do ar na estação Externa Regional se estendem de forma mais substancial até a estação Externa I (0,935), e apresentam correlações menos expressivas com as

demais estações. Isto fica evidente quando se analisa os coeficientes de correlação em conjunto com a Fig. 4. Outro dado importante é a correlação elevada entre as estações Externa I e Interna I (0,962), evidenciando a expressiva troca atmosférica que ocorre na região

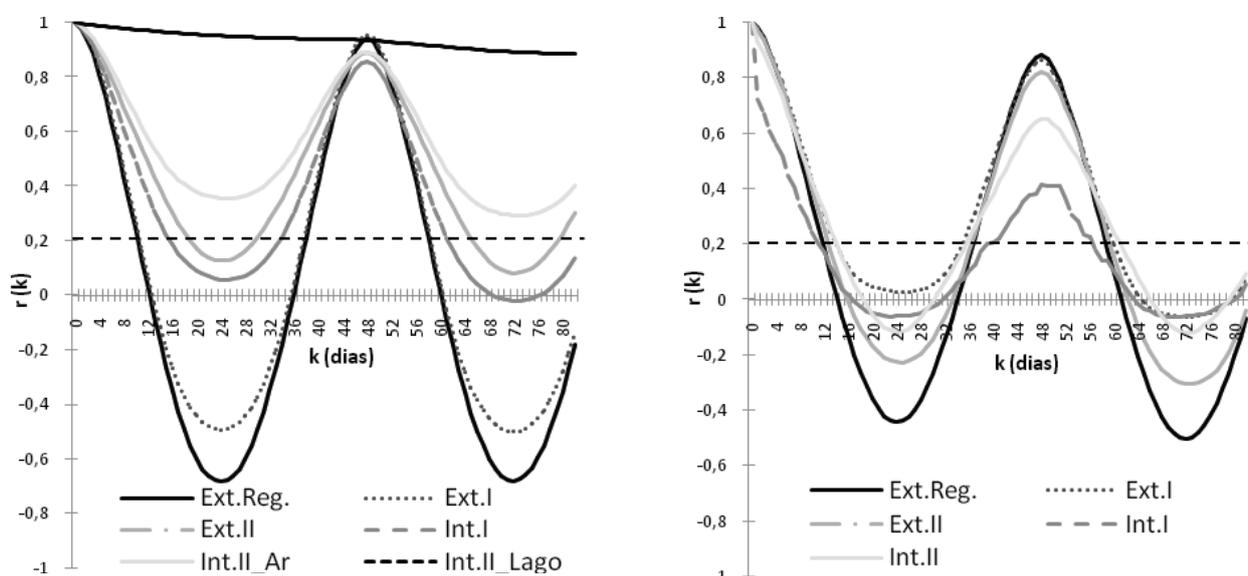
de entrada da caverna, recebendo influências cruzadas do meio externo e interno.

Por outro lado, a temperatura da água apresenta uma correlação mais significativa com as estações Lago do Cruzeiro Ar (0,773) e Externa II (0,669). Curiosamente, a correlação com a estação Interna I é menor (0,452), o que demonstra que as massas de ar originadas no ambiente externo prevalecem nesta zona de troca gasosa, sobretudo nos extremos menores (mínimas diárias), com a entrada do ar frio

na cavidade, o que pode ser observado na Fig. 4, no gráfico da estação Externa II do buraco do inferno e Lago do Cruzeiro – neste caso, apenas para o ar. Tanto o gráfico do Lago do Cruzeiro na Fig. 4 quanto e os coeficientes de correlação da Tab. 2 demonstram que a entrada de massas de ar frio no interior da caverna não é suficiente para esfriar a água do lago.

A análise dos padrões de variabilidade se complementa com a função de autocorrelação das séries (Fig. 5).

Figura 5. Gráfico comparativo dos correlogramas das estações de monitoramento da região do buraco do inferno da Lagoa do Cemitério: a) de temperatura; b) de umidade relativa do ar.



Os correlogramas da Fig. 5a demonstram a existência de dois padrões distintos de variabilidade nos dados de temperatura, governados pelas estações Externa Regional e Lago do Cruzeiro. As demais estações representam estágios transitórios entre estes extremos, se afastando do padrão de variabilidade do meio externo à medida que se aprofundam na dolina e adentram na caverna. As estações que atingem o efeito de memória são a Externa Regional (0,233 em 10 dias), Externa I (0,266; 10 dias), Externa II (0,199; 19 dias) e Interna I (0,221; 15 dias). Mais uma vez se observa uma relação de maior proximidade da estação Interna I com as externas e da estação Externa II com o Lago do Cruzeiro. As séries da estação Lago do Cruzeiro não atingem o índice mínimo de 0,2, impos-

sibilitando o conhecimento de seu efeito de memória, o que pode estar relacionado ao curto intervalo de monitoramento. Para a umidade relativa do ar (Fig. 5b), todas as estações atingem o índice 0,2, demonstrando que a variável que melhor permite a classificação do sistema em partes distintas é a temperatura.

Com base nestas análises, o modelo de circulação do ar para o buraco do inferno da Lagoa do Cemitério foi interpretado como uma armadilha para a captura do ar frio, onde a circulação de ar é mais ampla e efetiva no inverno, período em que a presente pesquisa foi realizada e, com base nas teorias e pesquisas anteriores sobre o tema (e.g. ERASO, 1969; CIGNA, 2004), relativamente mais restrita no verão.

DOLINA E GRUTA DO JOÃO BAIÃO

Externa Regional; Externa I e II; Abrigo e Gruta do João Baio (Tab. 3).

Na região da dolina e gruta do João Baio, foram consideradas cinco estações de monitoramento:

Tabela 3. Estatística descritiva da temperatura e umidade relativa do ar na região da dolina e gruta do João Baio.

Medida estatística	Externa Regional		Dolina e Gruta do João Baio							
			Externa I		Externa II		Abrigo		Caverna	
	UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. (°C)
Máxima	100,0	42,1	99,9	42,5	10,00	39,6	99,9	28,7	99,9	24,0
Média	51,7	24,3	56,8	23,7	65,2	23,3	73,9	21,6	89,0	22,0
Moda	99,9	21,3	99,9	21,3	99,9	21,8	80,7	23,5	99,9	22,0
Mínima	9,1	10,0	8,4	9,4	13,8	10,6	28,3	14,1	66,2	19,2
Amplitude	90,9	32,1	91,5	33,1	86,2	29,0	71,6	14,6	33,7	4,8
Desvio padrão	23,2	6,9	23,9	7,6	23,6	6,5	13,3	2,8	6,9	1,0

Legenda: UR = umidade relativa do ar; T = temperatura; T. ar = temperatura do ar; T. ág. = temperatura da água.

Org. do autor.

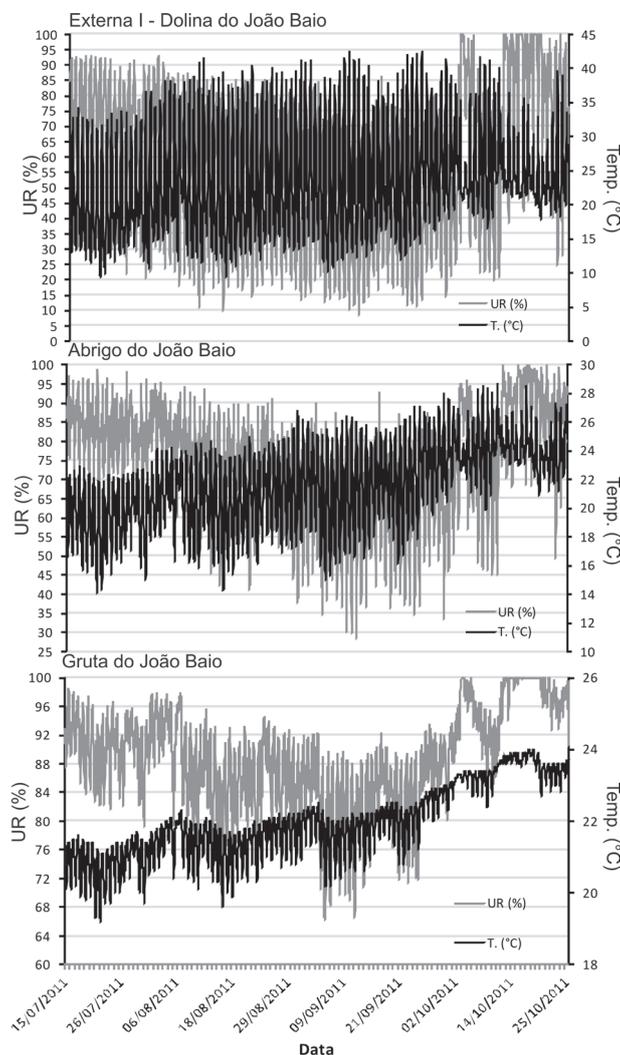
Embora o experimento de campo tenha sido dimensionado para que a estação Externa Regional captasse as maiores variações higrótérmicas na área de estudo, a estação Externa I, instalada na dolina do João Baio apresentou maior variação nos parâmetros aferidos. Isto pode ser explicado por fatores como: variação nos sensores de leitura; posição de instalação (a Externa Regional foi instalada em meio à cobertura vegetal rala da região, enquanto a estação Externa I estava em área um pouco mais exposta). Porém, a análise visual em gráfico demonstra que tais variações são mínimas (cf. coeficiente de correlação de 0,966, na Tabela 4), permitindo mesmo assim uma análise integrada.

Na estação Externa I, a temperatura máxima do período foi de 42,5 °C (25 de setembro de 2011, às 14h00min), a média e a moda foram de 23,74 °C e 21,3 °C respectivamente e a mínima foi de 9,4 °C (21 de julho de 2011; e 16 de agosto de 2011, às 6h30min). A umidade relativa do ar (Tab. 3) chegou à 8,4% (12 de setembro, às 15h30min), com média de 56,79% e máxima de 99,9% em diversos momentos em outubro de 2011.

Embora a estação Externa I tenha captado variações mais extremas, a sua média de temperatura

foi inferior à da estação Externa Regional (23,74 °C e 24,33 °C, respectivamente), demonstrando que a Externa Regional é mais representativa para a caracterização do microclima externo, onde a influência da insolação é maior. Estes valores vão se atenuando gradativamente, até o fundo da dolina. Na estação da caverna, os valores possuem menor variação, o que reflete diretamente na amplitude térmica, que não passou dos 4,6 °C. A região do Abrigo, que fica ao lado da ressurgência do sifão intermitente do João Baio, apresentou medidas menos amplas de temperatura, evidenciando a diminuição relativa da troca gasosa no ambiente, que pode ser atribuída pelo confinamento espacial relativo, pela ausência de insolação direta e pela proximidade aos corpos d'água. Em linhas gerais a umidade relativa apresentou padrão inversamente proporcional em cada estação, além de ser menor nas áreas mais expostas e gradativamente maior – à medida que se avança para o interior da dolina e da caverna. O padrão de variabilidade de estações representativas da região da dolina do João Baio é apresentado na Fig. 6.

Figura 6. Variação de temperatura e umidade relativa do ar na estação Externa I da dolina do João Baio, no período entre 15 de julho e 7 de outubro de 2011



O comportamento higrotérmico das estações externas é inversamente proporcional com marcado ciclo diurno, mesmo dentro da gruta do João Baio. Conforme a Fig. 6, na estação da Gruta, o ar não mantém elevada saturação hídrica, exceto em outubro quando se iniciaram as chuvas, diferente da gruta do buraco do inferno da Lagoa do Cemitério.

Os gráficos da fig. 6 chamam a atenção para alguns aspectos em uma análise conjunta, sem pormenorizar nas variações específicas de cada estação. A primeira delas é a alteração nos padrões de comportamento da umidade relativa do ar no mês de outubro, evidenciando que os dados de chuva apresentados an-

teriormente, embora provenientes de um pluviômetro de outra região do município de São Desidério, são representativos para esta região.

A segunda constatação é a existência de dois padrões de comportamento distintos, tal como já observado para o buraco do inferno da Lagoa do Cemitério. Nas estações mais expostas à insolação, o ciclo diurno é marcado e evidente, com elevação da temperatura durante o dia e repentina queda noturna, gerando gradientes térmicos diários superiores a 30 °C em alguns casos (dolina do João Baio). Provavelmente esta condição ocorre pela baixa umidade relativa do ar, devendo se atenuar na época das chuvas. A região

do Abrigo apresenta um padrão intermediário, onde nitidamente ainda há influência da atmosfera de fora da dolina – inclusive na elevação das temperaturas –, mas com predomínio de influência nas temperaturas mínimas, o que ocorre durante a noite, quando o ar se esfria e torna-se mais denso, dirigindo-se para as regiões mais baixas do relevo local, como as dolinas.

No caso da gruta do João Baio, nota-se que a influência térmica se limita às temperaturas mais baixas, típico de um modelo conceitual de armadilha para a captura do ar frio (ERASO, 1969; CIGNA, 2004). Porém, chamou a atenção o padrão de comportamento da umidade relativa do ar (Fig. 6), diferente do padrão que normalmente se observa em cavernas, tal como no buraco do inferno da Lagoa do Cemitério (Fig. 4)

e estudos anteriores (e.g. CALAFORRA et al., 2003; FERNANDEZ-CORTÉS et al., 2006; BADINO, 2009; LOBO, 2011), onde a umidade relativa está sempre próxima à saturação (99,9% - 100%). Para a gruta do João Baio, a umidade relativa do ar obedece às variações ocorridas no meio externo, atingindo níveis de saturação somente na época em que as chuvas se iniciaram. Atribui-se esta diferença ao pequeno tamanho da cavidade natural e sua posição específica no interior da dolina, fatores que propiciam maior dinâmica de troca gasosa e, por consequência, maior influência do meio externo. Os coeficientes de correlação r de Pearson auxiliam na interpretação destes dados (Tab. 4 e 5).

Tabela 4. Coeficientes de correlação r de Pearson entre as séries de dados de temperatura das estações de monitoramento da região da dolina e gruta do João Baio

	Ext.Reg.	Ext.I	Ext.II	Abrigo	Gruta
Ext.Reg.	1	0,966	0,933	0,814	0,470
Ext.I		1	0,970	0,840	0,477
Ext.II			1	0,855	0,524
Abrigo				1	0,846
Gruta					1

Legenda: Ext.Reg. = externa regional; Ext.I = externa I; Ext.II = externa II.

Org. do autor.

Tabela 5. Coeficientes de correlação r de Pearson entre as séries de dados de umidade relativa do ar das estações de monitoramento da região da dolina e gruta do João Baio

	Ext.Reg.	Ext.I	Ext.II	Abrigo	Gruta
Ext.Reg.	1	0,962	0,853	0,748	0,185
Ext.I		1	0,912	0,798	0,152
Ext.II			1	0,896	0,345
Abrigo				1	0,445
Gruta					1

Legenda: Ext.Reg. = externa regional; Ext.I = externa I; Ext.II = externa II.

Org. do autor.

Os coeficientes da Tab. 4 evidenciam a forte influência direta da estação Externa Regional nas estações Externa I (0,966), Externa II (0,933) e Abrigo (0,814). A estação Gruta do João Baio possui elevada correlação com a estação Abrigo (0,846) para a temperatura e um pouco menor, mas sendo a mais relevante, para a umidade relativa do ar (0,445; Tab. 5). A falta de dados sobre a temperatura da água dificulta

uma análise direta da interferência desta no sistema da dolina do João Baio. Mas é provável que exista alguma influência, o que se infere pela semelhança visual entre o gráfico da estação Gruta do João Baio (Fig. 6) e Lago do Cruzeiro (Fig. 4).

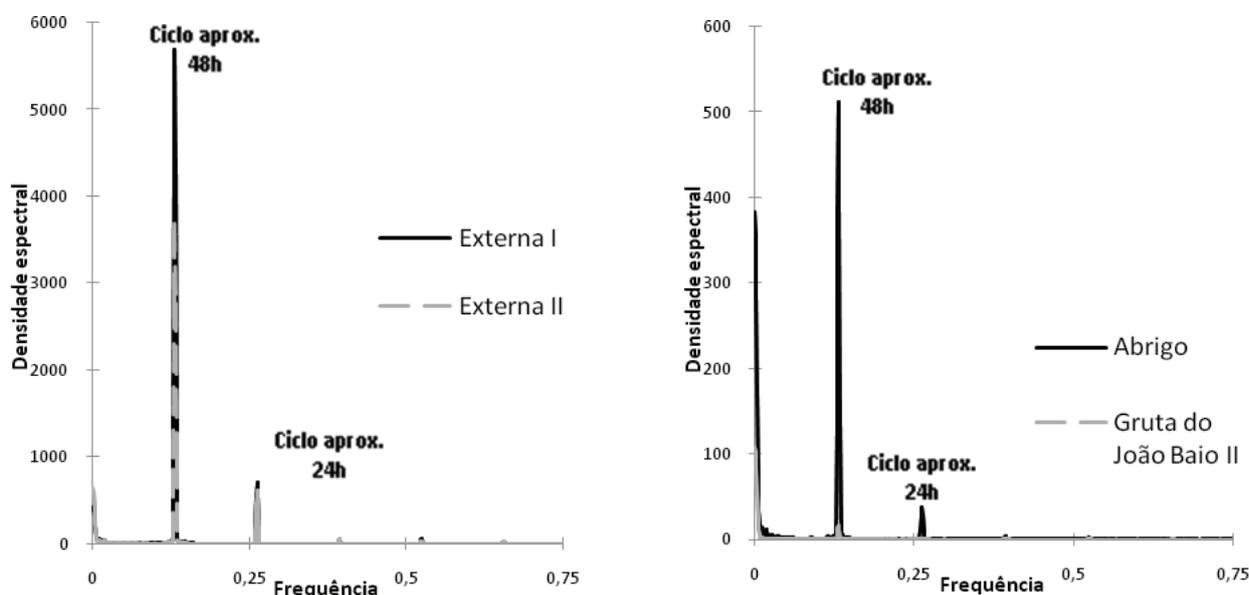
Por outro lado, o comportamento da umidade relativa do ar é bastante diferente entre estas duas cavidades: mais estável no buraco do inferno da La-

goa do Cemitério, enquanto na gruta do João Baio a variação é mais proporcional às variações do microclima externo, da dolina. Esta variação é atribuída à diferença do volume interno destas cavidades e da lâmina d'água de seus corpos hídricos interiores: o volume e área maiores do lago do Cruzeiro influenciam na manutenção da elevada umidade relativa do ar no interior da cavidade, enquanto que o pequeno lago da parte interna do sifão do João Baio, no interior da gruta do João Baio, não é suficiente para manter a

umidade constantemente elevada, que recebe, então, influências maiores do meio externo. A elevação da umidade justamente na época das chuvas corrobora esta interpretação.

Por fim, os dados da região da dolina do João Baio foram analisados por meio da densidade espectral, de forma a identificar se os fenômenos cíclicos que incidem na região foram captados pelas séries registradas (Fig. 7).

Figura 7. Função de densidade espectral das séries de temperatura da região da dolina do João Baio



Org. do autor.

As séries de dados das estações Externa I e II (Fig. 7a) e Abrigo (Fig. 7b) apresentam fenômenos cíclicos semelhantes, com padrões aproximados de 48 e 24h, embora em distintas escalas de densidades espectral. Por sua vez, a série da estação Gruta do João Baio apresentou apenas um ciclo evidente de aproximadamente 48h. Para as séries Abrigo e Gruta do João Baio, percebe-se também a existência de fenômenos cíclicos maiores (especial destaque para a série da Gruta, onde o fenômeno não identificado supera o pico de aprox. 48h em densidade espectral). Com isso, nota-se que se trata de padrões distintos de comportamento atmosférico, podendo ser caracterizados como subzonas atmosféricas espeleoclimáticas.

Modelo conceitual de circulação atmosférica local

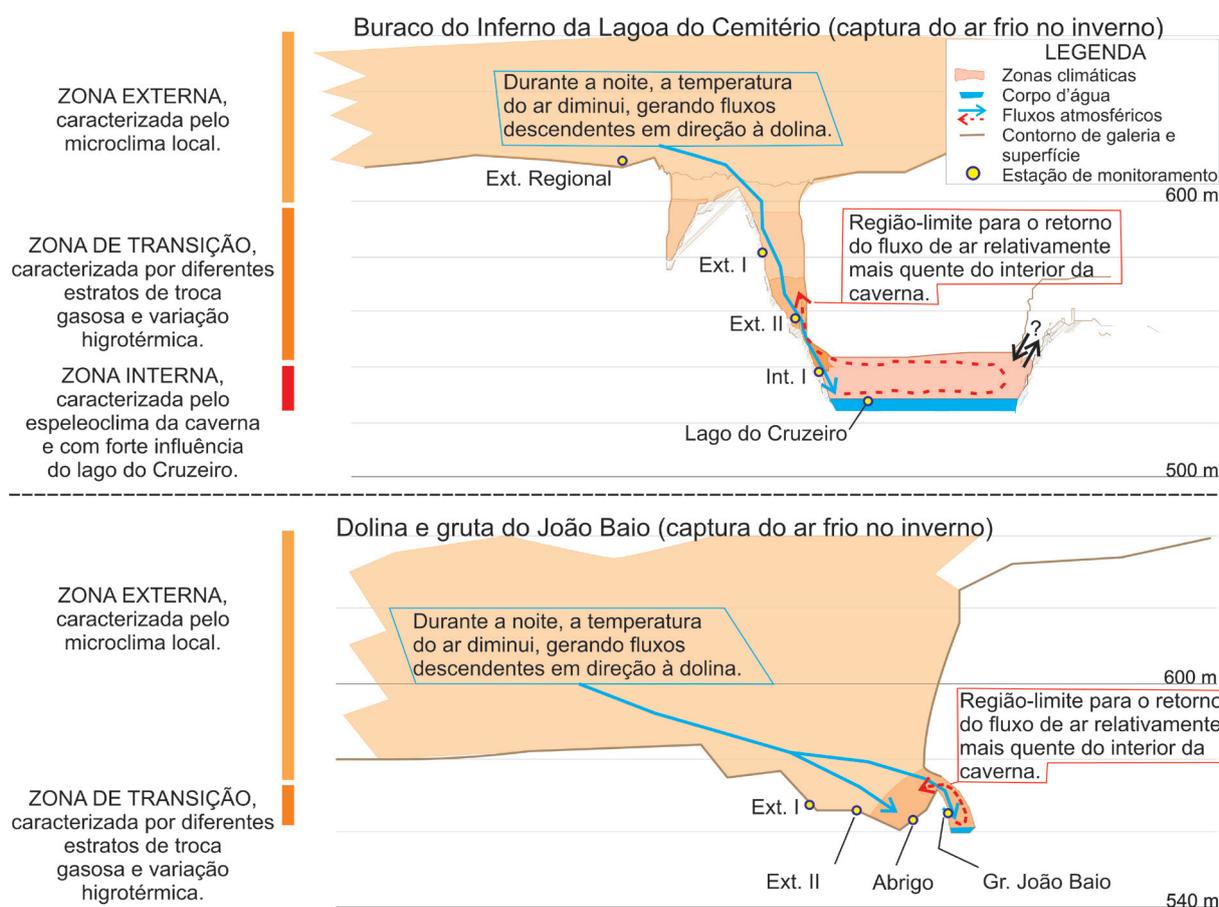
Os aspectos de destaque nos dados registrados são as elevadas máximas diárias, acima dos 40 °C e as temperaturas chegando a valores abaixo dos 10 °C no período noturno – provavelmente devido à baixa umidade relativa do ar. Esta, por sua vez, atingiu valores baixos em alguns dias, próximos dos 10%, em virtude da prolongada estiagem que afetava a região. Certamente, trata-se de um microclima de superfície e de um espeleoclima nas dolinas e cavernas muito diferentes de outros padrões já identificados no Brasil, onde as variações diárias raramente ultrapassam a casa dos 15 °C de amplitude e as máximas no interior

das cavernas giram em torno dos 20 °C – 21 °C (e.g. BOGGIANI et al., 2007; LOBO, 2011).

O estudo preliminar do microclima local e espeleoclima da região de São Desidério, nas microrregiões das dolinas do buraco do inferno da Lagoa do Cemitério e do João Baio, permitiu a sua inserção no modelo conceitual das armadilhas para a captura do ar frio (cf. ERASO, 1969; CIGNA, 2004), apesar da li-

mitação amostral focada no período do inverno. Além disso, os diferentes padrões de variação higrótérmica observados permitiram esboçar um modelo conceitual com zonas atmosféricas (Fig. 8), usando para tanto a concepção proposta por Lobo et al. (2009).

Figura 8. Modelo conceitual preliminar da armadilha para a captura de ar frio das dolinas do buraco do inferno e do João Baio e suas cavidades naturais associadas



Org. do autor.

De um modo geral, pode-se concluir que a existência de um corpo d'água de grandes dimensões e de uma cavidade natural de maior volume interno, são fatores que permitem a existência de um espeleoclima diferenciado do microclima externo no buraco do inferno da Lagoa do Cemitério. No caso da dolina e gruta do João Baio, embora exista um corpo d'água associado e tenha ocorrido diferenciação nos

padrões de circulação atmosférica, compreende-se que a região do Abrigo e da gruta é uma única zona, equivalente à zona de transição termoclimática das cavidades naturais.

No entanto, vale ressaltar que a confirmação final desta interpretação se faz possível com um futuro monitoramento no verão, quando a entrada de ar externo dependerá do gradiente térmico diurno

na região e da variação na pressão atmosférica: se as noites forem mais quentes, a troca gasosa poderá diminuir; se forem frias, a entrada de massas de ar continuará a ser expressiva.

CONCLUSÕES

O presente estudo apresenta o primeiro registro conhecido de dados atmosféricos contínuos no Brasil tanto para grandes dolinas quanto para cavernas em zonas climáticas mais áridas. Na gruta do João Baio, a média de temperatura do ar girou em torno de 22 °C, e no buraco do inferno da Lagoa do Cemitério, em torno dos 23 °C no ar e dos 24 °C na água – valores próximos, porém sempre abaixo, da média de temperatura do ar do microclima regional, que foi de 24,33 °C. A umidade relativa do ar do microclima regional foi de aproximadamente 52% (com um valor mínimo de 9,1%), valor bem abaixo dos 89% da gruta do João Baio e dos 99% do buraco do inferno da Lagoa do Cemitério. Estes valores de temperatura e umidade relativa do ar, em conjunto com a presença de corpos d'água, evidenciam o aprisionamento parcial do ar e o fluxo energético relativamente menor nestes ambientes em relação ao meio externo.

As dolinas e cavernas pesquisadas foram categorizadas como armadilhas para a captura do ar frio (*cold traps*), que recebem mais influência da atmosfera externa adjacente quando a temperatura do ar esfria. As temperaturas mais altas, registradas durante o dia mesmo no período do inverno, não afetam de modo significativo a temperatura do ar e da água no interior das dolinas e cavernas.

Com base nestas constatações, é possível também obter uma conclusão preliminar sobre o potencial turístico das cavernas da região, cuja beleza cênica se ressalta em âmbito nacional. Com a constatação do padrão de circulação atmosférica exposto, as cavernas se mostram mais propícias para a visitação, dado o potencial dispersivo de eventuais impactos gerados na temperatura e concentrações de gás carbônico em função da presença humana. Nestas condições, o ar aquecido circulará para fora das cavernas ou entrará em rápido equilíbrio térmico com o ambiente. No entanto, é recomendável que este potencial seja também checado do ponto de vista biótico e com a presença

de visitas/piloto para análises sobre a resposta efetiva do espeleoclima à visitação, antes de concluir sobre o efetivo potencial turístico das cavernas da região.

REFERÊNCIAS

- BADINO, G. The cueva de los Cristales micrometeorology. In: WHITE, W. (Ed.) INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15, 2009, Kerrville. *Proceedings*. Kerrville: UIS/NSS, 2009, v.3, p.1407-1412.
- BAILEY, W.G. Microclimatology. In: OLIVER, J.E. (Ed.). *Encyclopedia of world climatology*. Dordrecht: Springer, 2005. p.486-499.
- BOGGIANI, P.C.; SILVA, O.J.; GESICKI, A.L.D.; GALATI, E.; SALLES, L.O.; LIMA, M.M.E.R. Definição de capacidade de carga turística das cavernas do Monumento Natural Gruta do Lago Azul (Bonito, MS). *Geociências*. Rio Claro, v.26, n.4, p.333-348, 2007.
- BOURGES, F.; MANGIN, A.; D'HULST, D. Le gaz carbonique dans la dynamique de l'atmosphère des cavités karstiques: l'exemple de l'Aven d'Ornac (Ardèche). *Earth and Planetary Sciences*, v.333, p.685-692, 2001.
- CALAFORRA, J.M.; FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; SÁNCHEZ-MARTOS, F.; GISBERT, J.; PULIDO-BOSCH, A. Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential show cave before tourist use. *Environmental Conservation*, v.30, n.2, p.160-167, 2003.
- CAMPOS, J.E.G.; DARDENNE, M.A. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, Brasil. v. 27, n.3, p. 269 – 282, 1997.
- CIGNA, A.A. Climate of caves. In: GUNN, J. (Ed.) *Encyclopedia of caves and karst science*. London: Taylor & Francis, 2004. p.467-475.

- ERASO, A. La corrosión climática em las cavernas. *Boletín Geológico y Minero*, v.80, n.6, p.564-581, 1969.
- FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; CALAFORRA, J.M.; SÁNCHEZ-MARTOS, F.; GISBERT, J. Microclimate processes characterization of the giant geode of Pulpí (Almería, Spain): technical criteria for conservation. *International Journal of Climatology*, v.26, p.691-706, 2006.
- FREITAS, C.R. de; SCHMEKAL, A. Condensation as a microclimate process: measurement, numerical simulation and prediction in the Glowworm cave, New Zealand. *International Journal of Climatology*, v.23, p.557-575, 2003.
- GASPAR, M.T.P. *Sistema aquífero Urucuia: Caracterização regional e propostas de gestão*. 2006. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 2006.
- GRUPO BAMBUÍ DE PESQUISAS ESPELEOLÓGICAS (GBPE). *Mapa do sistema cárstico do rio João Rodrigues*. Belo Horizonte: s.d. 1 folha.
- INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (INEMA). *Relatório de informações hidrologicas e meteorológicas*. Disponível em: <<http://sistemas.inga.ba.gov.br/sistemas/planilhas/plu/>>. Acesso em 22 jan. 2012.
- LAROCQUE, M.; MANGIN, A.; RAZACK, M.; BANTON, O. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology*, v.205, p.217-231, 1998.
- LOBO, H.A.S. *Estudo da dinâmica atmosférica subterrânea na determinação da capacidade de carga turística na caverna de Santana (PETAR, Iporanga-SP)*. 2011. 392 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2011.
- LOBO, H.A.S. Espeleoclima e suas aplicações no manejo do turismo em cavernas. *Revista do Depto. de Geografia USP*, v.23, p.27-54, 2012.
- LOBO, H.A.S.; PERINOTTO, J.A. de J.; POUDOU, S. Análise de agrupamentos aplicada à variabilidade térmica da atmosfera subterrânea: contribuição ao zoneamento ambiental microclimático de cavernas. *Revista de Estudos Ambientais*, Blumenau, v.11, n.1, p.22-35, 2009.
- LUETSCHER, M.; JEANNIN, P.Y. Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes. *Terra Nova*, v.16, n.6, p.344-350, 2004.
- MANGIN, A. Pour une meilleure connaissance des systems hydrologiques a partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, v.67, p.25-43, 1984.
- MANGIN, A.; ANDRIEUX, C. Infiltration et environnement souterrain, le role de l'eau sur les paramètres climatiques. *Actes des Journées Félix Trombe*, Moulis, p.79-95, 1988.