

ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS APLICADA À VARIABILIDADE TÉRMICA DA ATMOSFERA SUBTERRÂNEA: CONTRIBUIÇÃO AO ZONEAMENTO AMBIENTAL MICROCLIMÁTICO DE CAVERNAS

Heros Augusto Santos Lobo¹, José Alexandre de Jesus Perinotto² e
Stanislas Poudou³

Resumo: O zoneamento ambiental de cavernas é uma técnica de classificação do ambiente subterrâneo para fins de conservação, manejo e uso sustentável. Na maioria das vezes, é feito com base em critérios subjetivos e em métodos mais compatíveis com áreas amplas, como as unidades de conservação da natureza. Partindo deste cenário, realizou-se uma pesquisa na caverna de Santana, localizada no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira – PETAR –, sudoeste do Estado de São Paulo, com o uso de uma rede de coleta e registro de dados de temperatura e umidade relativa do ar. Os resultados mostram a dinâmica atmosférica da caverna e permitiram a verificação da existência de interferência antrópica nos atributos aferidos. As discussões foram desenvolvidas com base nas teorias tradicionais de zoneamento climático de cavernas e evoluíram para a proposta de criação de zonas homogêneas por meio da análise de agrupamentos. Com isso, conclui-se que o procedimento estatístico multivariado testado e os procedimentos de coleta e análise de dados empregados permitiram a classificação de um zoneamento ambiental preliminar para a caverna de Santana, possibilitando a construção futura de métodos mais amplos e menos subjetivos de zoneamento de cavernas.

Palavras-chave: Manejo Ambiental. Microclima. PETAR. Zoneamento Espeleológico.

1 Introdução

A atmosfera no interior de uma caverna e suas adjacências imediatas, na maioria dos casos, se distinguem do ambiente que as cerca, caracterizando-se como um microclima subterrâneo (CIGNA, 1968). Este fenômeno ocorre em função das particularidades deste tipo de ambiente, como o confinamento espacial, ausência de luz solar direta e, quase sempre, alta umidade do ar. Por conta destes fatores, na maioria das vezes o microclima subterrâneo é marcado por uma dinâmica ambiental diferenciada, com respostas atenuadas dos parâmetros ambientais às alterações de curto prazo ocorridas no ambiente externo.

Por consequência, o ambiente subterrâneo possui um nível de especialização altíssimo, tanto no que diz respeito à biota – gerando casos extremos de adaptabilidade, como os organismos especializados, os troglóbios (TRAJANO; BICHUETTE, 2006) –, quanto aos minerais (PULIDO-BOSCH et al., 1997; FORTI et al., 2007), ao estudo das chuvas e sua relação

com a percolação de água nas fraturas das rochas (CRUZ JÚNIOR et al., 2005) e até mesmo para a conservação de vestígios arqueológicos (HOYOS et al., 1998).

Diversos estudos em todo o mundo já foram realizados acerca da caracterização física do microclima das cavernas. As principais contribuições que fornecem a base para o presente estudo foram feitas por: Cigna (1968), que apresenta a dinâmica física da circulação de ar no interior de cavernas; Cigna e Forti (1986), que aprofundam a questão com base nas correntes de convecção de ar no ambiente subterrâneo; Fernández-Cortés et al. (2006), com seu estudo sobre a interferência da temperatura ambiente nos cristais do geodo gigante de Pulpí, na Espanha; e Stoeva e Stoev (2005), que apresentam zonas microclimáticas para o ambiente subterrâneo. Além destes, alguns trabalhos em território nacional também são dignos de nota, como os estudos feitos por Veríssimo et al. (2005) na gruta de Ubajara, no Ceará, e por Boggiani et al. (2001, 2007) nas grutas Nossa Senhora Aparecida e do Lago Azul,

¹ UNESP/Rio Claro – SP.
E-mail: heroslobo@hotmail.com.

² E-mail: perinotto@rc.unesp.br.

³ E-mail: stanislas.poudou@hotmail.fr.

REA – Revista de *estudos ambientais*
v.11, n. 1, p. 22-35, jan./jun. 2009

em Bonito, Mato Grosso do Sul. Por fim, outro trabalho basilar para a linha de raciocínio adotada na pesquisa que deu origem a este artigo foi o de Heaton (1986), que fez uma revisão sobre o conceito de níveis de circulação de energia no ambiente subterrâneo, tendo o fluxo de água como seu principal indicador.

Partindo do exposto, buscou-se investigar uma proposta mais apurada de classificação de zonas microclimáticas no ambiente subterrâneo, com o objetivo de fornecer maior detalhe para a compreensão de sua dinâmica. Além disso, o presente estudo permite subsidiar futuras decisões de manejo para fins de uso público que dependam de uma hierarquia de níveis de fragilidade e de um zoneamento ambiental para apontar diretrizes para o uso e conservação.

2 Material e Métodos

A pesquisa foi realizada na caverna de Santana, no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira – PETAR –, Sudoeste do Estado de São Paulo (Figura 1). Esta foi escolhida em função de diversos fatores, como: sua complexidade morfofisiográfica – diversos níveis de galerias, áreas com rio corrente e secas, salões confinados com baixa troca gasosa com o restante do sistema –; importância para o turismo local; áreas abertas e fechadas ao uso público; histórico de pesquisas anteriores; e a facilidade de acesso.

Para a realização do estudo, foi montada uma rede de monitoramento microclimático com termohigrômetros registradores de dados (Figura 1). Ao todo foram instalados em nove pontos distintos, sendo dois deles no entorno imediato e sete no interior da caverna. Os equipamentos possuíam uma precisão de 0,3° C para Temperatura – T – e 2% para Umidade Relativa do Ar – UR. O trabalho de campo se desenvolveu durante o mês de setembro de 2008, com todos os equipamentos funcionando em sincronia e com um intervalo de aferição de seis horas, totalizando quatro registros diários: 03:00, 09:00, 15:00 e 21:00 h. Durante este período, foram anotados os dias e horários de todas as visitas turísticas realizadas no ambiente, de modo a verificar possíveis interferências antrópicas na variabilidade aferida da T e UR.

Posteriormente, os dados foram analisados por meio da estatística descritiva, amplitude térmica diária e sua relação com o total de visitantes, frequência, correlação e análise estatística multivariada de agrupamentos.

A estatística descritiva foi aplicada aos dados brutos e à amplitude térmica diária. Foram obtidas as medidas de tendência central e de dispersão em cada ponto de coleta de dados. Com os dados brutos, verificou-se também a frequência de ocorrência das diversas temperaturas obtidas, de modo a visualizar em gráfico a análise descritiva.

As análises de correlação foram feitas por meio do coeficiente r de Pearson, que indica o grau de associação linear entre variáveis distintas (GERARDI; SILVA, 1981). Por meio deste procedimento foram levantadas hipóteses de interferência antrópica nos dados coletados, as quais foram posteriormente investigadas a partir do isolamento dos valores originais aferidos em conformidade com os dias mais visitados, para uma análise mais detalhada.

A análise de agrupamentos foi utilizada na discussão sobre zoneamento microclimático, que partiu de conceitos já publicados por Stoeva e Stoev (2005), sobre zonas térmicas, e por Heaton (1986), sobre níveis de circulação de energia. Tais experiências são ainda incipientes, sobretudo se comparadas a estudos de outras áreas, nas quais o zoneamento ecológico e climático possui bases sólidas já construídas. Exemplos que influenciaram o presente trabalho foram encontrados em Khan e Kim (1998) e Cardoso e Dias (2004) para dados pluviométricos; Diniz et al. (2003) para zonas térmicas com base nas temperaturas máximas e mínimas; e Fritzsons et al. (2008) para a relação entre zonas climáticas e altitude.

Conforme Gerardi e Silva (1981) e Landim (2003), a análise de agrupamentos têm como objetivo maximizar as semelhanças entre os dados, criando classes distintas, bem como diferenciar estas classes entre si. Diniz et al. (2003) acrescentam, ainda, que esta técnica vem sendo utilizada para diversas pesquisas climatológicas, tendo eles próprios aplicado o estudo à identificação de regiões homogêneas de temperaturas máximas e mínimas no Estado do Rio Grande do Sul.

REA – Revista de *estudos ambientais*
v.11, n. 1, p. 22-35, jan./jun. 2009

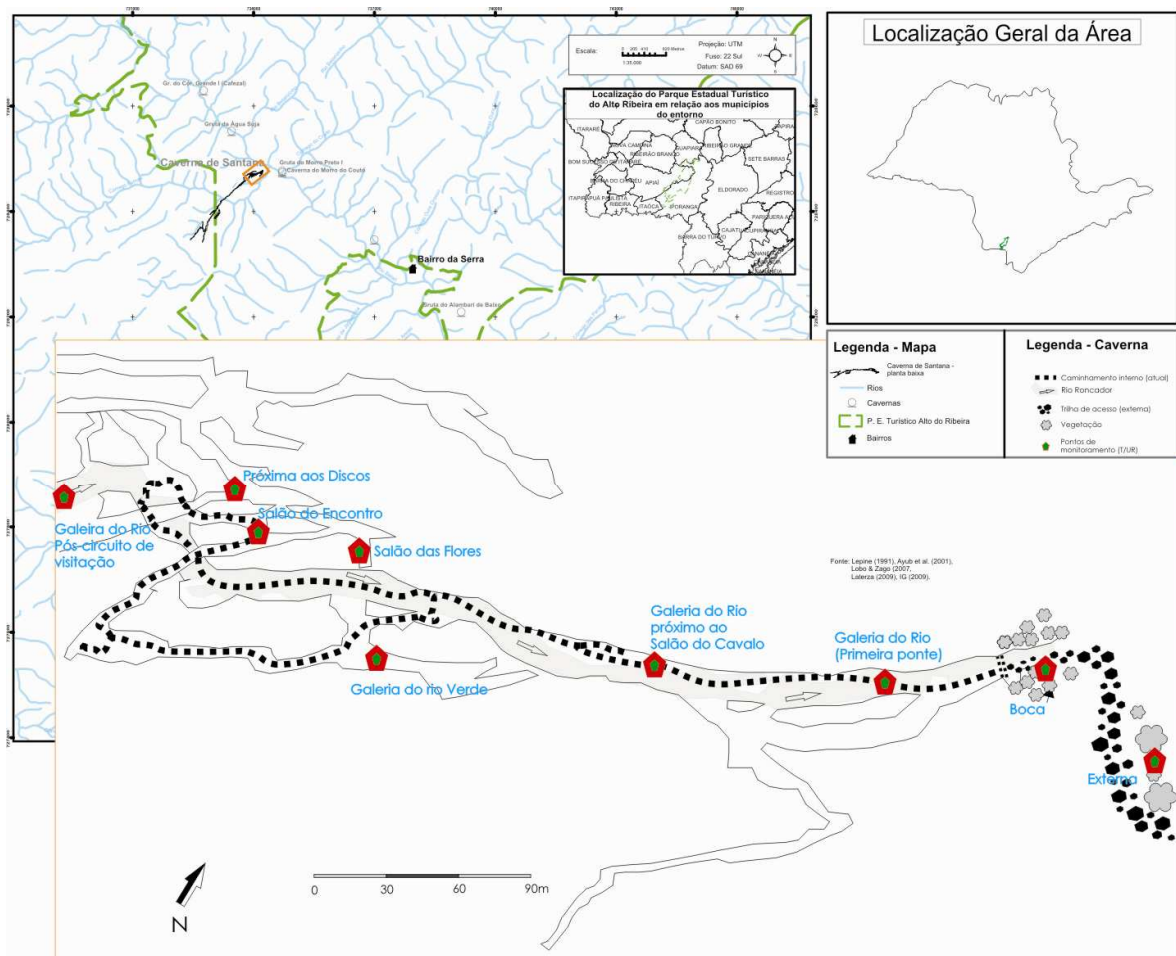


Figura 1 – Distribuição dos pontos de coleta de dados na caverna de Santana e sua localização em relação ao Estado de São Paulo. Adaptado a partir de Ayub et al. (2001), IG (2009), Laterza (2009), IGc (1991) e Lobo (2005).

Foi utilizada a técnica de agrupamentos hierárquicos, que se baseia na menor distância euclidiana entre dois pontos de uma matriz de similaridades, e no agrupamento por variância mínima, ou método Ward (LANDIM, 2000; 2003). Esta foi preferida pelo fato de que seu enfoque é sobre a variabilidade dos dados, de modo que os agrupamentos sejam efetuados quando se determina que em pares de casos analisados em conjunto há um menor acréscimo da variabilidade (LANDIM, 2000). Além disso, Seidl et al. (2008) demonstraram, em um estudo sobre produtores de leite, que o método Ward é bastante eficiente na definição da quantidade de agrupamentos a serem utilizados.

Para tanto, utilizou-se do aplicativo *XLStat* versão 7.5, uma extensão aplicável ao programa *Excel for Windows*. Foram testados vários conjuntos de dados, apresentados em dendrogramas, o que permitiu a seleção de critérios mais

adequados para o zoneamento termo-microclimático da caverna de Santana. Posteriormente foram criadas zonas termoclimáticas, graficamente representadas na planta baixa da caverna.

3 Resultados

A coleta de dados gerou um total de 120 dados de cada variável analisada em cada ponto. Nos nove pontos a coleta de T funcionou regularmente, mas a coleta de dados de UR só foi feita integralmente em quatro pontos e de modo parcial em outros dois. Em três deles não houve registros de dados de UR. Como os equipamentos já haviam sido testados anteriormente sem apresentar problemas desta ordem e voltaram a funcionar depois, atribui-se a falha pontual ao alto nível geral de UR no interior da caverna e entorno imediato, com valores sempre próximos ao ponto de

saturação (99,9%). Assim, os dados de UR não foram considerados no presente estudo.

Os resultados gerais para a T são apresentados na Figura 2.

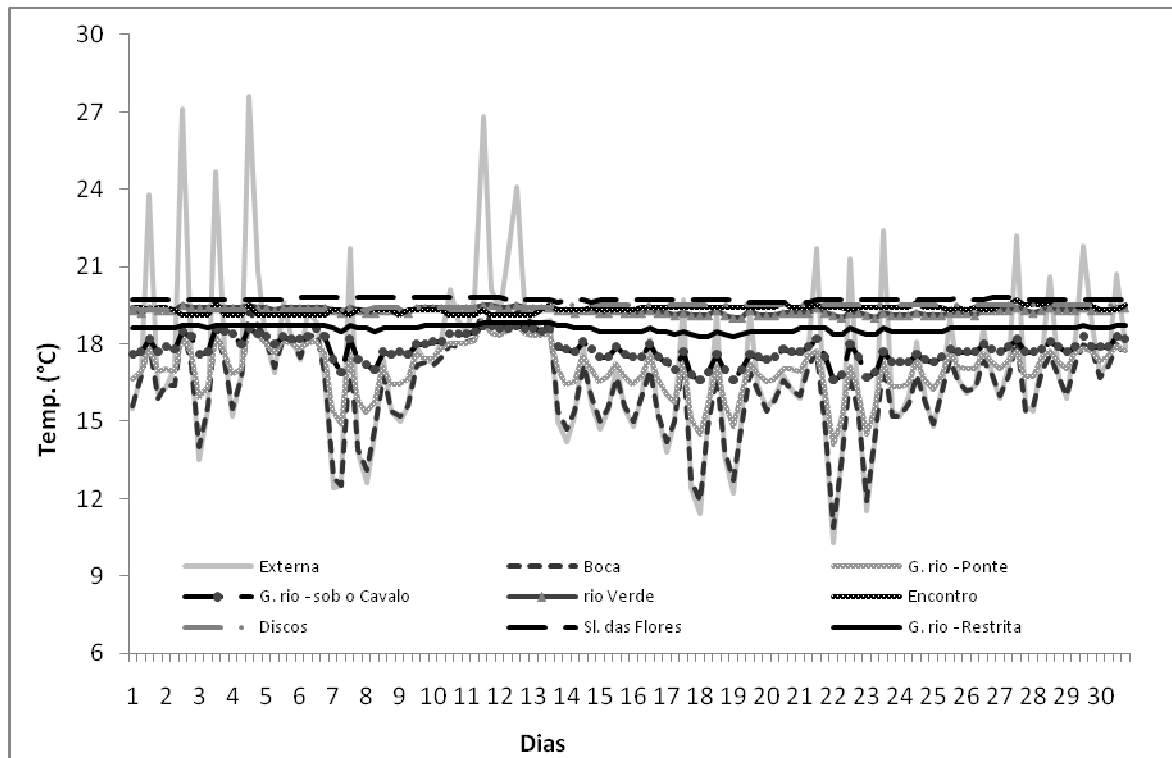


Figura 2 – Resultados das coletas de T (°C) na caverna de Santana no mês de setembro de 2008. As aferições foram feitas em intervalos de seis horas, iniciando-se às 3:00 h de cada dia.

Os gráficos da Figura 2 demonstram uma relação visual entre a variabilidade termoclimática externa e interna na caverna de Santana, com menor influência à medida que se avança para o seu interior. Todavia, mesmo em áreas mais restritas, como na galeria superior (pontos: rio Verde, Encontro e Discos) e na galeria do rio Roncador logo após o circuito de visitação, pode-se perceber sutis variações térmicas em função das variações exteriores. Note-se também que esta influência é maior na dilatação: a) dos valores mínimos nos pontos amostrados nos metros iniciais da galeria do rio (Boca, Ponte e Sob o Cavalo); b) dos valores máximos na galeria superior (rio Verde e Encontro); e c) nas máximas e mínimas na galeria do rio na área pós-visitação. No ponto “Discos” não houve nenhuma influência aparente da T externa e no ponto “Salão das Flores” existem pequenas variações que sugerem a possibilidade de interferência externa, mas com um breve intervalo de tempo – o que seria aceitável, dado o confinamento desta área.

A interferência do ambiente externo é maior na dilatação dos valores mínimos do que em relação às máximas de cada ponto

amostrado. O mesmo não ocorre no caso da UR, que permaneceu por quase todo o experimento em um valor constante de 99,9% na maior parte dos pontos aferidos da galeria superior.

O primeiro passo foi a identificação das amplitudes diárias de T em cada um dos pontos amostrados e, a partir deste dado, uma análise descritiva da amplitude térmica da caverna, com identificação da máxima, média, mediana, moda e mínima. Os resultados são sintetizados na Figura 3.

Os dados ilustrados na Figura 3 evidenciam uma alta estabilidade térmica do ar na galeria superior e na galeria de rio pós-área de visitação na caverna de Santana, com a ocorrência de amplitude mínima e da moda igual a zero em diversos dias – especialmente nos pontos “Encontro”, “Discos” e “Salão das Flores”. Nos pontos “Discos”, “Salão das Flores” e “Rio pós-visitação”, esta estabilidade é também evidenciada por meio da baixa amplitude diária máxima, com valores em torno de 0,2° C e 0,3° C, em contraste com a máxima externa de 12,4° C e de 3,0° C na galeria do rio em ponto próximo ao “Salão do Cavalo”.

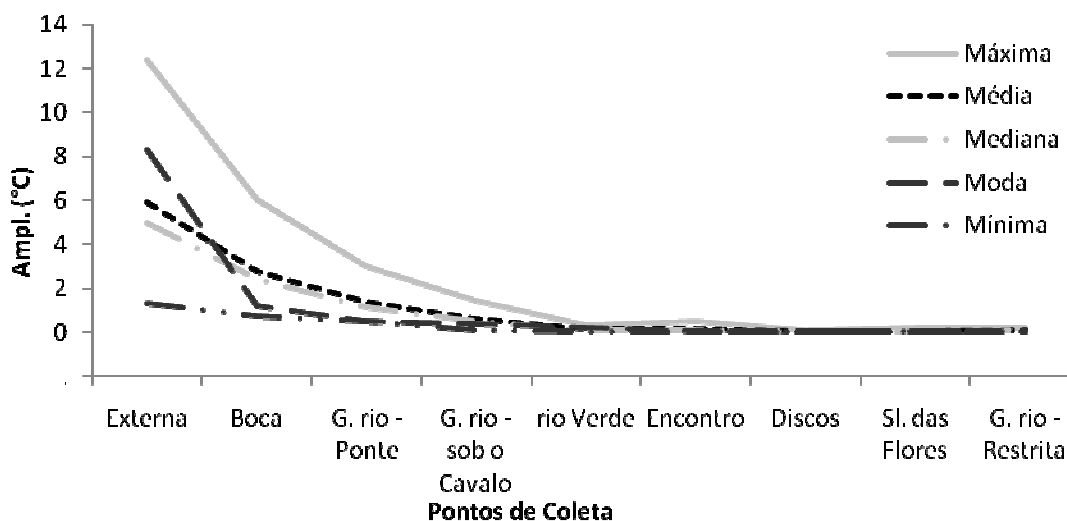


Figura 3 – Análise estatística descritiva das amplitudes térmicas diárias nos nove pontos amostrados na caverna de Santana.

Dando continuidade às análises, foram também realizadas a estatística descritiva dos dados brutos e a distribuição das frequências dos valores de T ambiente em todos os pontos amostrados, apresentados na Figura 4.

Os gráficos de frequência da Figura 4 demonstram uma alta relação entre a T externa e o interior da caverna até a galeria de rio na altura do Salão do Cavalo, tanto nas médias de T quanto na distribuição frequencial dos valores. O sistema apresenta maior estabilidade térmica do ar na galeria superior e em zonas mais a montante da galeria de rio, com os valores quase coincidentes da moda, média, mediana, máxima e mínima.

Uma hipótese a ser considerada neste ponto seria a provável interferência da presença humana nos resultados encontrados, ou seja, os padrões apresentados refletem a dinâmica climática da caverna de Santana para o mês de setembro ou haveria incremento térmico no ambiente em função da visitação?

Para buscar elucidar esta questão, foram feitos testes gráficos e estatísticos. Buscou-se relacionar a T ambiente e a amplitude térmica diária com o total de visitas no mês na caverna, que foram registrados por meio de acompanhamento diário. A primeira destas relações, na forma gráfica, é apresentada na Figura 5.

A Figura 5 demonstra que não existe relação aparente entre o aumento da amplitude térmica diária na caverna e a

variação no total de visitas dentro dos limites ora praticados. Durante o mês foram registrados quatro picos de visitação, nos dias 4, 13 (109 visitas/cada), 20 (104 visitas) e 27 (207 visitas¹). As maiores amplitudes térmicas não correspondem a estes dias nem tampouco a dias imediatamente posteriores, o que permite concluir pela inexistência de impactos na temperatura na escala de análise adotada. Os pontos de coleta que constam no gráfico refletem a realidade dos demais pontos de coleta de dados na caverna.

Além disso, os dados também foram testados por meio de procedimentos estatísticos, usando para tanto a correlação pelo coeficiente r de Pearson para analisar todas as variáveis entre si e verificar possibilidades de interferência antrópica na dinâmica microclimática, com os valores apresentados na Tabela 1.

Os dados da Tabela 1 demonstram uma correlação significativa entre a amplitude diária do “Salão do Encontro” e o total diário de visitantes, com um coeficiente r igual a 0,574. Desta forma, confere maior detalhe e uma nova perspectiva sobre as impressões geradas na Figura 5. Nesse sentido, é importante frisar que tanto a Figura 5 quanto a Tabela 1 apresentam dados focados na amplitude térmica diária e sua relação com o total de visitantes. Isto porque a coleta de dados sobre o fluxo de visitação não foi feita em tempo real durante todo o mês, impossibilitando uma correlação direta com os dados brutos de T ambiente

REA – Revista de *estudos ambientais*
v.11, n. 1, p. 22-35, jan./jun. 2009

registrados. Mesmo nos dias em que houve a participação de monitores ambientais locais devidamente instruídos para o registro dos horários de entrada, passagem nos pontos de coleta e saída com seus grupos,

predominaram as falhas nos dados, impossibilitando qualquer tentativa de uso para os objetivos da pesquisa. Assim, optou-se por trabalhar apenas com os dados consolidados da visitação diária.

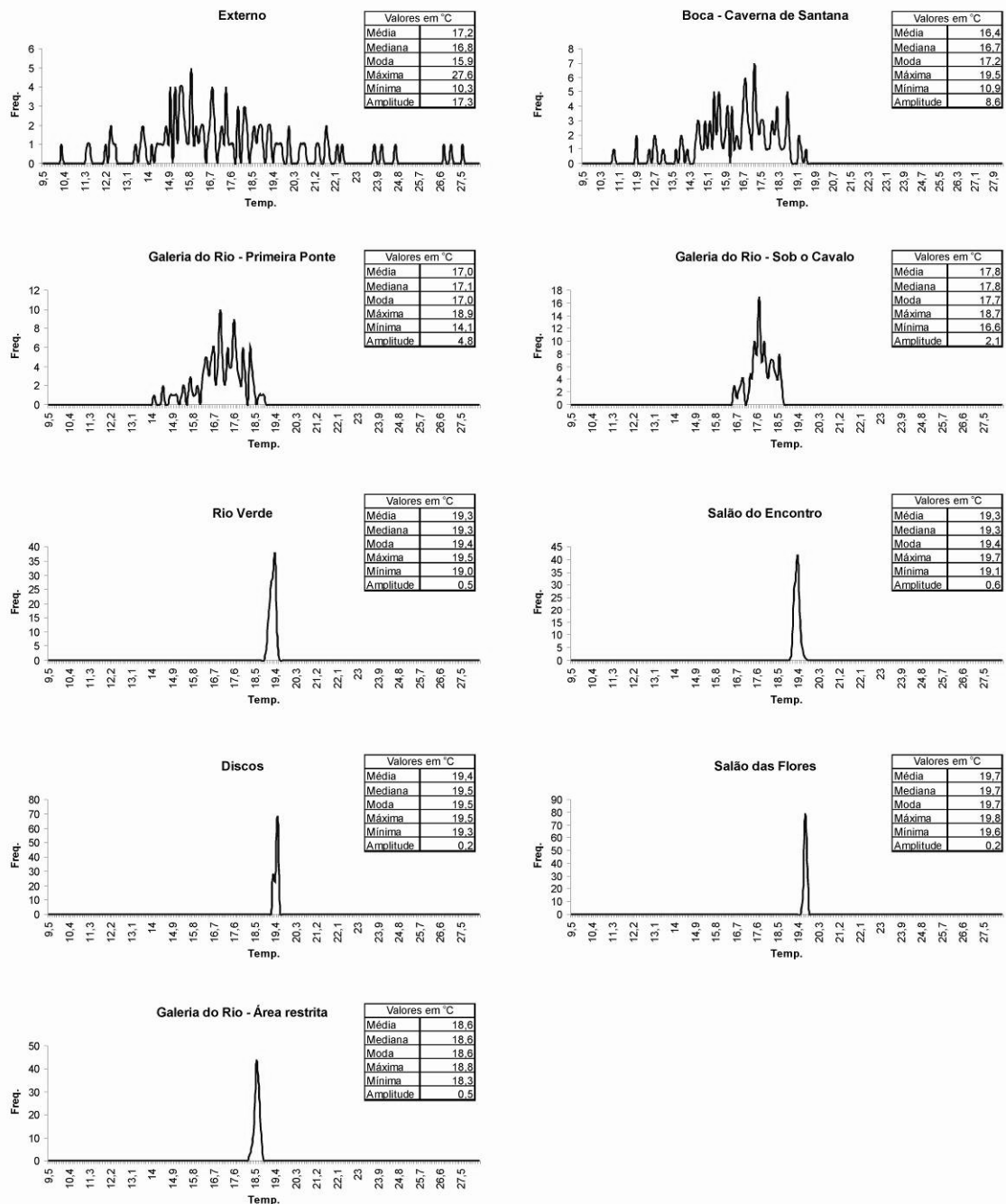


Figura 4 – Estatística descritiva e distribuição frequencial de T ambiente nos nove pontos amostrados da caverna de Santana. As frequências são contadas em unidades e a T ambiente em °C.

REA – Revista de *estudos ambientais*
v.11, n. 1, p. 22-35, jan./jun. 2009

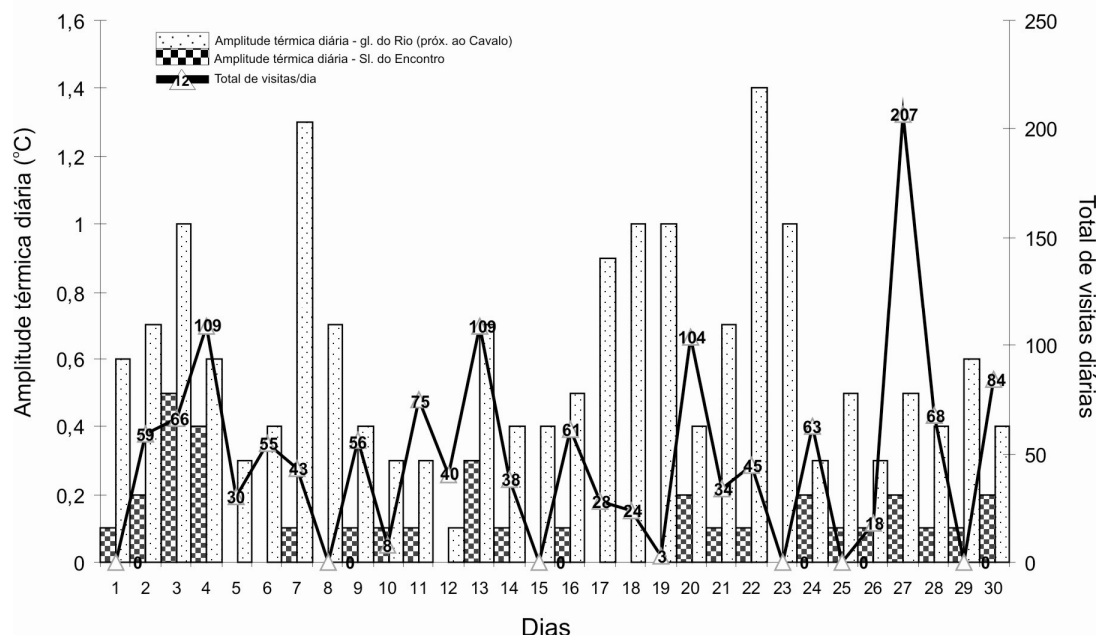


Figura 5 – Gráfico de relação da amplitude térmica diária em dois pontos da caverna de Santana com o total de visitas.

Tabela 1 – Correlação entre as amplitudes diárias das variáveis estudadas e o total de visitantes por meio do coeficiente r de Pearson.

	Externa	Boca	Rio – 1ª Ponte	Rio – sob o Cavalo	r . Verde	Encontro	Discos	Sl. das Flores	Rio – Pós visit.
Visitantes	0,051	(0,084)	(0,169)	(0,141)	(0,221)	0,574	(0,084)	0,086	(0,274)

Partindo do resultado da Tabela 1 e com uma análise minuciosa dos dados originais, foram observados os dias com maior fluxo de visitação na caverna, sendo

estes selecionados e analisados separadamente. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise estatística descritiva dos dados de T ambiente em função da visitação em três situações: geral do mês de setembro, dias de pico e demais dias do mês.

Variável	Geral	Dias de Pico	Demais Dias do Mês
Total de visitantes	1.427	529	898
Total de dias com visitação	24	4	20
Média (visitantes/dia)	59,45	132,25	44,9
Média da T – Externa (°C)	17,24	17,93	17,13
Média da T – Gl. do rio (próximo ao Cavalo) (°C)	17,81	18,05	17,77
Média da T – Salão do Encontro (°C)	19,34	19,39	19,33
Máxima da T – Externa (°C)	27,6	27,6	27,1
Máxima da T – Gl. do rio (próximo ao Cavalo) (°C)	18,7	18,6	18,7
Máxima da T – Salão do Encontro (°C)	19,7	19,7	19,6
Amplitude diária da T – Externa (°C)	12,4	12,4	11,2
Amplitude diária da T – Gl. do rio (próximo ao Cavalo) (°C)	1,4	0,7	1,4
Amplitude diária da T – Salão do Encontro (°C)	0,5	0,4	0,5

REA – Revista de *estudos ambientais*
v.11, n. 1, p. 22-35, jan./jun. 2009

Embora a Tabela 1 apresente indícios da existência de impactos na T ambiente no “Salão do Encontro” em função da visitação, os dados da Tabela 2, utilizada para verificar a hipótese levantada, demonstram o contrário, confirmando a impressão antes sugerida na Figura 5. O aumento das máximas, médias e da amplitude no “Salão do Encontro” nos quatro dias com picos de visitação coincide com o aumento das mesmas medidas no ponto “externo” de coleta de dados. Isto se confirma por meio da análise de correlação entre estes dois pontos para a amplitude, com um coeficiente r igual a 0,315, confirmando esta segunda hipótese. Desta forma, pode-se afirmar que a alteração destas medidas não acontece por causa antrópica, sendo reflexo direto da dinâmica climática do ambiente.

4 Discussão

Os dados levantados e analisados permitem a formulação de uma primeira proposta de zoneamento microclimático da caverna, com base na temperatura ambiente. A divisão de um ambiente em zonas homogêneas a partir de suas características pode trazer inúmeras aplicações, como a identificação de áreas mais suscetíveis aos impactos da presença humana e outras cuja dinâmica natural excede as possibilidades de alteração por origem antrópica. Com isso, contribui-se para o aprimoramento do conceito de níveis de circulação de energia no ambiente subterrâneo, proposto a partir de estudos feitos por Trombe (1952) e Eraso (1969), revisado por Heaton (1986) e comentado analiticamente por Pulido-Bosch et al. (1997). Em sua revisão, Heaton identificou três níveis de circulação de energia, com base em indicadores ambientais qualitativos e perceptivos. O seu enfoque é centrado, sobretudo, na ausência ou presença de cursos d’água, bem como em seu volume e velocidade.

Recentemente, o conceito vem sendo bastante utilizado para fins de manejo turístico, de forma a subsidiar a formação de propostas compatíveis com a premissa de conservação do ambiente. Scaleante (2003) apresenta um primeiro exemplo nesse sentido, citando exemplos de níveis de circulação de energia alto (galeria do rio Roncador) e baixo (Complexo Taqueupa) na caverna de Santana. Esta sugestão de classificação foi utilizada por Lobo (2005)

para seu primeiro estudo de capacidade de carga da caverna. Posteriormente, Lobo e Zago (2007) apresentaram uma revisão da aplicação do conceito na caverna de Santana, reclassificando a galeria do rio como área de moderada circulação de energia e a galeria superior (que inclui o Complexo Taqueupa) como área de baixa circulação de energia. Esta nova proposta é utilizada no estudo que atualmente direciona a capacidade de carga da caverna, de 117 visitas diárias, realizado por Lobo (2008).

Sgarbi (2003) também apresenta análises sobre a circulação de energia em cavernas, definindo-a grosseiramente como o nível de troca de massa entre o ambiente subterrâneo e externo. O autor menciona que esta troca é maior nos locais com presença de luz, sugerindo, portanto, ser menor em locais mais profundos das cavernas. Na continuidade, afirma que uma caverna é um ambiente de baixa energia e que a entrada de um único visitante causa impacto, alterando a dinâmica climática do ambiente. Esta última afirmação do autor pode ser sumariamente descartada, já que o presente estudo e outros já realizados (e.g.: Pulido-Bosch et al., 1997; Hoyos et al., 1998; Calaforra et al., 2003; Fernández-Cortés et al., 2006) demonstram que a dinâmica atmosférica do ambiente subterrâneo, em linhas gerais, não é tão sensível à presença humana quanto os estudos mais ortodoxos colocam.

Mais um exemplo de zoneamento e classificação climática, desta feita com base exclusivamente na variabilidade térmica, é dado pelo trabalho de Stoeva e Stoev (2005). Os autores propõem três zonas termoclimáticas para as cavernas:

- zona heterotérmica: mais próxima à superfície e aos acessos ao meio externo,
- zona transicional insaturada: zona intermediária,
- zona de temperaturas constantes: que mantém a temperatura e a umidade relativa do ar mais constantes na atmosfera cavernícola.

A proposta de classificação deixa lacunas, por não apresentar parâmetros nem, tampouco, que formas de análises podem ser feitas para se chegar a estes resultados.

Um último exemplo é dado por Boggiani et al. (2007), que, ao estudar a dinâmica higrótérmica da gruta do Lago Azul, em Bonito-MS, descartou o uso da T e UR

REA – Revista de *estudos ambientais*
v.11, n. 1, p. 22-35, jan./jun. 2009

como indicadores de manejo da presença humana, dado o seu elevado nível de circulação de energia. Este foi atestado pela similaridade entre as variações microclimáticas entre meio interno e externo da gruta.

Os estudos citados fornecem diretrizes para a proposta em questão, de identificar indicadores quantitativos e mais objetivos para a delimitação de um zoneamento ambiental com base nas

variações dos parâmetros estudados. O objetivo é conferir maior grau de detalhe ao zoneamento, deixando de lado a simplificação genérica dos níveis de circulação de energia trabalhados no plano conceitual-perceptivo.

A partir dos resultados obtidos, poder-se-ia obter uma primeira classificação de zonas microclimáticas da caverna de Santana, apresentada na Figura 6.

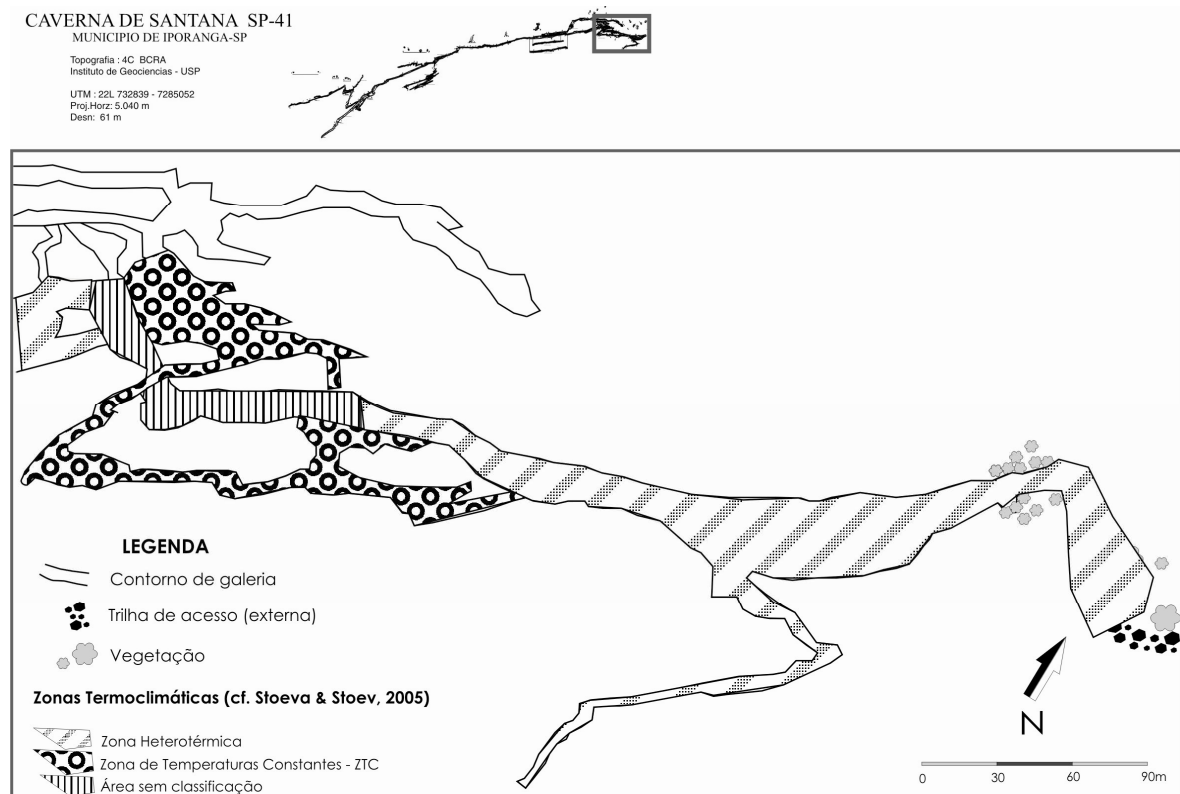


Figura 6 – Primeira classificação de zonas termo-microclimáticas para o mês de setembro de 2008 na área monitorada da caverna de Santana e adjacências. Planta baixa adaptada de IGc (1991) e Lobo & Zago (2007).

As duas zonas microclimáticas da caverna foram baseadas nos resultados apresentados nas Figuras 3 e 4, utilizando a classificação de Stoeva e Stoev (2005) na legenda. Note-se a falha gerada em uma área da galeria de rio, onde se torna impossível uma classificação com base nos dados coletados. Seria este trecho da galeria, conforme classificação de Stoeva e Stoev (2005), uma ZTI? Ou seria mais correto extrapolar os dados e classificar toda a galeria do rio como uma Zona Heterotérmica?

Na tentativa de responder a estes questionamentos podem surgir alguns problemas para o zoneamento climático, como a classificação de uma zona por

análise indutiva, a necessidade de aumento dos pontos de coleta para um melhor detalhamento, e a criação de zonas pouco representativas para as perspectivas apresentadas. De igual modo, uma classificação baseada nos níveis de circulação de energia de Heaton (1986) seria igualmente generalista, já que este autor toma por base a variação do indicador água para propor zonas tróficas no ambiente cavernícola. Para uma adaptação, um estudo mais prolongado e feito em diversas cavernas seria necessário, de modo a não incorrer em equívocos ao simplesmente transpor a nomenclatura para os indicadores microclimáticos analisados.

REA – Revista de *estudos ambientais*
v.11, n. 1, p. 22-35, jan./jun. 2009

Visando a buscar alternativas viáveis de classificação com base nos dados propostos, optou-se pelo uso da análise de

agrupamentos, aplicada a quatro conjuntos de dados distintos, conforme configuração exposta na Figura 7.

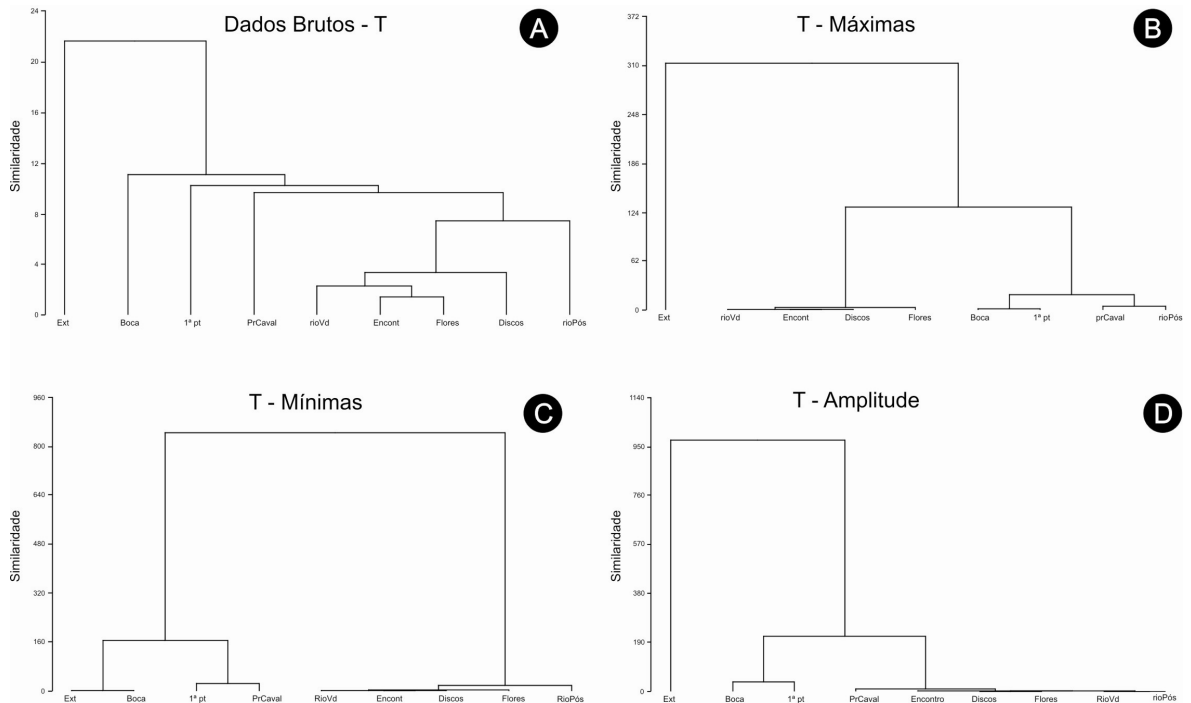


Figura 7 – Análises de agrupamentos em quatro conjuntos distintos de dados: os dados de T coletados em campo (A); as máximas (B), mínimas (C) e a amplitude térmica (D) diárias.

A partir das análises de agrupamentos foram identificadas novas possibilidades de zoneamento termoclimático para a caverna de Santana. No teste A, obteve-se uma quantidade excessiva de zonas, que se agruparam apenas em níveis maiores de similaridade. Os testes C e D apresentaram possibilidades de agrupamento que não correspondem à realidade da caverna, pois colocam em um mesmo grupo pontos da galeria do rio (Rio Pós-visitação) e da superior (p.e. Discos em C e Rio Verde em D). Por outro lado, o teste B demonstrou uma possibilidade de agrupamento muito próxima à realidade encontrada em campo na caverna, distinguindo as zonas em função de sua distância com o meio externo e/ou em relação aos níveis de galerias. Outro ponto a favor no teste B é o fato de que com menos de 50% do total da escala de similaridade, todos os agrupamentos já foram estabelecidos, bem como a ligação com o meio externo. Com base nesse resultado, o zoneamento termoclimático da caverna de Santana é apresentado na Figura 8.

A nova proposta reflete a realidade encontrada na caverna, apresentando zonas bem distintas e homogêneas com base nas

máximas diárias em cada um dos pontos cotados. De forma resumida, cada uma das zonas propostas apresenta características comuns, o que permite uma sugestão inicial de classificação:

- Zona Externa (ZE): grande amplitude térmica, com as maiores máximas e mínimas do período;
- Zona Transicional (ZT): estende-se desde alguns metros antes da boca da caverna até imediações da entrada do Salão do Cavalo e primeira escada da galeria superior. As variações nas mínimas acompanham o ambiente externo (Figura 1), o que é mais atenuado nas máximas. Amplitude térmica diária máxima variando na faixa entre 6° C (boca) e 1,4° C (Próximo ao Cavalo). Desigualdade entre as medidas de média, mediana e moda nos três pontos mensurados. Máximas diárias atenuadas pela presença do rio e pelas trocas de ar com o ambiente externo;
- Zona Interna Típica (ZIT): Temperaturas máximas variando entre 18,7° C e 18,8° C,

REA – Revista de *estudos ambientais*
v.11, n. 1, p. 22-35, jan./jun. 2009

demonstrando maior estabilidade que a zona anterior, mas ainda com influência direta do meio externo (Figura 1) e do rio, que ajudam a manter o ambiente mais frio. Variações da ordem de 0,1^o a 0,2^o C entre as medidas de tendência central (média, moda e mediana) em cada ponto mensurado. Baixa amplitude diária, variando entre 0 e 1,4^o C;

- Zona de Baixa Amplitude Térmica (ZBA): Ambiente ligeiramente mais quente que a galeria do rio, com

máximas variando entre 19,3^o C e 19,5^o C. Medidas de tendência central muito próximas umas das outras, sendo exatamente coincidentes no ponto “Discos”. Amplitude térmica diária não passa de 0,5^o C;

- Zona de Temperatura Estável (ZTE): Máximas e mínimas diárias muito próximas das medidas de tendência central, com valores entre 18,4^o C e 18,6^o C. Amplitude térmica diária máxima de 0,2^o C, mas com média, moda e mediana igual a 0.

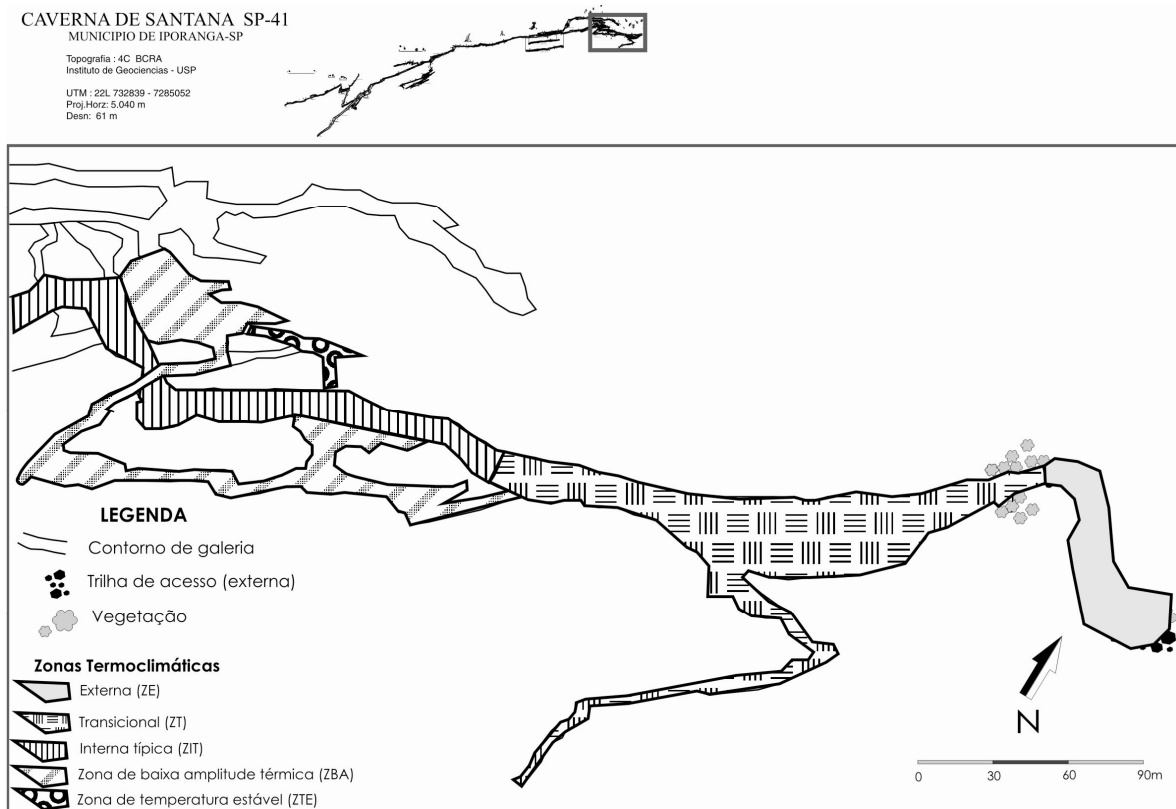


Figura 8 – Zoneamento termo-microclimático da caverna de Santana para o mês de setembro de 2008, com base nas máximas diárias. Planta baixa adaptada de IGc (1991) e Lobo & Zago (2007).

Com isso, observa-se a possibilidade da adequada e satisfatória utilização da análise de agrupamentos para a criação de zonas climáticas em cavernas, oferecendo parâmetros mais claros e objetivos para as propostas de zoneamento. Além da classificação *per se*, também permite a utilização dos dados para identificação de possíveis relações entre as condições da atmosfera cavernícola e a fauna, as rochas e espeleotemas e os critérios de utilização para fins de uso público (pesquisa científica, monitoramento ambiental, estudo do meio e

ecoturismo, entre outras possibilidades menos convencionais).

5 Conclusões

O presente estudo permitiu demonstrar a aplicabilidade prática do uso da análise de agrupamentos para a definição de zonas climáticas em uma caverna, mesmo com baixa densidade amostral (dez pontos de coleta) e intervalo de registro (quatro aferições diárias). Estudos futuros deverão mesclar a proposta apresentada com dados

REA – Revista de *estudos ambientais*
v.11, n. 1, p. 22-35, jan./jun. 2009

hígricos em proporção semelhante, considerando duas possibilidades principais:

- Coleta de dados em diferentes períodos de tempo, de forma a analisar a dinâmica microclimática subterrânea nos distintos regimes pluviais e estações do ano
- Uso combinado de dados de temperatura ambiente e umidade relativa do ar – sendo esta a proposta inicial – para verificar a correlação entre as variáveis e traçar um zoneamento mais completo para cada caverna pesquisada.

Outro aspecto igualmente importante ora testado foi o uso do coeficiente de correlação r , para a identificação de impactos antrópicos nos dados amostrados. Embora tenham apresentado uma relação com significância entre o total de visitantes e a variação térmica em um dos pontos, as demais análises efetuadas demonstraram

tratar-se de mera coincidência. Tal fato reafirma o que coloca Landim (2003), de que nem toda comprovação estatística representa uma relação denexo causal, servindo, no máximo, para a formulação de hipóteses a serem devidamente investigadas.

Quanto ao caso estudado, a caverna de Santana, a proposta de zoneamento termo-microclimático baseado na temperatura máxima pode ser útil como um primeiro subsídio para uma composição efetiva de divisão de seu espaço interior, com vistas ao seu correto manejo e conservação. As cinco zonas identificadas serão testadas e validadas por novas pesquisas de longo prazo, bem como ampliadas a partir de outros pontos de coleta, para permitir uma classificação mais ampla e de acordo com a sua dinâmica microclimática.

6 Cluster analysis applied to thermal variability of subterranean atmosphere: contribution to environmental zoning of cave microclimate.

Abstract: *The environmental zoning in caves is a technique of classification of the underground environment for the conservation, management and sustainable use. In most cases, is based on subjective criteria and in methods more compatible with wide spaces, such as natural protected areas. Under this scenario, a research was made in the Santana cave, located at State Touristic Park of Upper Ribeira river – PETAR –, southwest of São Paulo State, with the use of a network of dataloggers for collecting and recording data of temperature and relative humidity. The results show the dynamics of the air in cave and allowed the verification of the existence of anthropogenic impacts in the attributes measured. Discussions were developed based on traditional theories of climate zoning in caves and progressed to the proposed creation of homogeneous areas through the cluster analysis. Therefore, it is concluded that the multivariate statistical and the procedures tested for collecting and analyzing data have enabled to create a preliminary classification of Santana cave microclimate, allowing the future construction of methods whose are wide and less subjective for zoning of environment of the caves.*

Key-words: Environmental Management; Microclimate; PETAR; Speleological Zoning.

7 Notas

¹ Este total de visitantes excede a capacidade de carga atual da caverna, constituindo-se em um teste realizado para verificar se o limite atual é representativo sob a ótica dos impactos no ambiente.

8 Referências

AYUB, S.; CUCHI, F.; FORTI, P.; ZINI, L. Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca a Poluição de Aquíferos Cársticos em Ambientes Tropicais Através da Utilização do Programa

Sintacs. 2001. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 13, 2001, Brasília. **Proceedings**. Brasília: UIS/SBE, 2001. p. 125-9.

BOGGIANI, P.C.; GALATI, E.A.B.; DAMASCENO, G.A.; NUNES, V.L.B.; SHIRAKAWA, M.A.; SILVA, O.J.; MORACCHIOLI, N.; GESICKI, A.L.D.; RIBAS, M.M.E.; MARRA, R.JC.; SOUSA, B.P.C. de. Environmental Diagnostics as a Toll for the Planning of Tourist Activity – The Case of Lago Azul and Nossa Sra. Aparecida Caves – Bonito/MS – Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 13, 2001, Brasília. **Proceedings**. Brasília: UIS/SBE, 2001. p. 299-300.

REA – Revista de *estudos ambientais*
v.11, n. 1, p. 22-35, jan./jun. 2009

- BOGGIANI, P.C.; SILVA, O.J. da; GESICKI, A.L.D.; GALLATI, E.A.B.; SALLES, L. de 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.
- 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.
- CARDOSO, A. de O.; DIAS, P.L. da S. Identificação de Trimestres Extremos no Regime Pluviométrico do Sul e Sudeste do Brasil em Relação com Anomalias da TSM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 1, p. 149-162. 2004.
- CIGNA, A.A. An Analytical Study of Air Circulation in Caves. **International Journal of Speleology**, v. 3B, n. 1/2, p. 42-54. 1968.
- CIGNA, A. A.; FORTI, P. The Speleogenetic Role of Air Flow Caused by Convection: 1st Contribution. **International Journal of Speleology**, v. 15, p. 41-52. 1986.
- CRUZ JÚNIOR, F.W.; KARMANN, I.; MAGDALENO, G.B.; COICHEV, N.; VIANA JÚNIOR, O. Influence of Hydrological and Climatic Parameters on Spatial-Temporal Variability of Fluorescence Intensity and DOC of Karst Percolation Waters in the Santana Cave System, Southeastern Brazil. **Journal of Hydrology**, n. 302, p. 1-12. 2005.
- DINIZ, G.B.; BERLATO, M.A.; CLARKE, R.T.; FONTANNA, D.C. Identificação de Regiões Homogêneas de Temperatura Máxima e Mínima do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 2, 303-312. 2003.
- ERASO, A. La Corrosión Climática en las Cavernas. **Boletín de Geología Minera**, vol. 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.
- FORTI, P.; GALLI, E.; ROSSI, A. The Mineralogical Study on the Cueva de Las Velas (Naica, Mexico). **Acta Carsologica**, v. 36, n. 3, p. 379-388. 2007.
- FRITZSONS, E.; MANTOVANI, L.E.; AGUIAR, A.V. de. Relação Entre Altitude e Temperatura: Uma Contribuição ao Zoneamento Climático no Estado do Paraná. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 10, n. 1, p. 49-64. 2008.
- GERARDI, L.H. de O.; SILVA, B.C.N. **Quantificação em Geografia**. São Paulo: Difel, 1981.
- HEATON, T. Caves: A Tremendous Range in Energy Environments on Earth. **National Speleological Society News**, v. 08, n. 44, p. 301-4. 1986.
- HOYOS, M.; SOLER, V.; CAÑAVERAS, J.C.; SÁNCHEZ-MORAL, S.; SANZ-RUBIO, E. Microclimatic Characterization of a Karstic Cave: Human Impact on Microenvironmental Parameters of a Prehistoric Rock Art Cave (Candamo Cave, Northern Spain). **Environmental Geology**, v. 33, n. 4, p. 231-242. 1998.
- IGc – INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA USP. **Mapeamento Geomorfológico da Caverna de Santana**. Relatório de iniciação científica (Graduação em Geologia), Instituto de Geociências, USP. São Paulo: IGC, 1991.
- IG – INSTITUTO GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Base de Dados do Meio Físico: Hidrografia e Cavernas**. São Paulo: IG, 2009.
- KHAN, V.; KIM, I. A Análise de Agrupamento Pluviométrica nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10, 1998, Brasília. **Anais**. Brasília: CBMet, 1998. p. 1-5.
- LANDIM, P.M.B. **Análise Estatística de Dados Geológicos Multivariados**. Rio Claro: Lab. Geomatématica, 2000.
- LANDIM, P.M.B. **Análise Estatística de Dados Geológicos**. 2 ed. Rio Claro: Edunesp, 2003.
- LATERZA, F.V. **Mapa de Ocupação Humana – Agrupamentos 5 e 6**. São Paulo: Ekos Brasil/Fundação Florestal, 2009.
- LOBO, H.A.S. Considerações Preliminares Para a Reestruturação Turística da Caverna de Santana – PETAR, Iporanga, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 28, Campinas. **Anais**. Campinas: SBE, 2005. p. 77-87.
- LOBO, H.A.S. Capacidade de Carga Real (CCR) da Caverna de Santana, PETAR-SP e Indicações Para o Seu Manejo Turístico. **Geociências**, v. 27, n. 3, p. 369-385. 2008.
- LOBO, H.A.S.; ZAGO, S. Classificação dos Níveis de Circulação de Energia no Circuito Turístico da Caverna de Santana – PETAR – Iporanga, SP. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE ESTUDOS DO CARSTE, 2, 2007, São Paulo. **Resumos Expandidos e Simples**. São Paulo: Redespeleo, 2007. p. 113-122.

REA – Revista de *estudos ambientais*
v.11, n. 1, p. 22-35, jan./jun. 2009

PULIDO-BOSCH, A.; MARTÍN-ROSALES, W.; LÓPEZ-CHICANO, M.; RODRÍGUEZ-NAVARRO, M.; VALLEJOS, A. Human Impact in a Tourist Karstic Cave (Aracena, Spain). **Environmental Geology**, v. 31, n. 3-4, p. 142-9. 1997.

SCALEANTE, J.A.B. **Avaliação do Impacto de Atividades Turísticas em Cavernas**. Campinas, 2003, 82 p. Dissertação (Mestrado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.

SEIDL, E.J.; MOREIRA JÚNIOR, F. de J.; ANSUJ, A.P.; NOAL, M.R.C. Comparação Entre o Método Ward e o Método K-Médias no Agrupamento de Produtores de Leite. **Ciência e Natura**, v. 30, n. 1, p. 7-15. 2008.

SGARBI, M. **Metodologia de Manejo em Cavernas para Minimização de Impactos Ambientais Decorrentes de Atividade Antrópica: Estudo de Caso Gruta do Chapéu & Caverna Santana, Parque Estadual do Alto do Ribeira / SP**. Mogi das Cruzes, 2003, 47 p. Relatório de Iniciação Científica, Universidade de Mogi das Cruzes.

STOEVA, P.; STOEV, A. Cave Air Temperature Response to Climate and Solar and Geomagnetic Activity. **Memorie Della Società Astronomica Italiana**, v. 76, p. 1042-1047. 2005.

TRAJANO, E.; BICHUETTE, M.E. **Biologia Subterrânea**. São Paulo: Redespeleo, 2006.

TROMBE, F. **Traité de Speleologie**. Paris: Payot, 1952.

VERÍSSIMO, C.U.V.; RICARDO, J.M.; BARCELOS, A.C.; NOGUEIRA NETO, J.A.; SILVA FILHO, W.F.; NACIMENTO JÚNIOR, J.V.; PAIVA, A.O. Espeleoturismo e Microclima da Gruta de Ubajara, CE. **Estudos Geológicos**, Recife, v. 15, p. 244-53. 2005.

8 Agradecimentos

Ao prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim (IGCE/UNESP), pela transmissão de seus conhecimentos em sala de aula, por sua leitura prévia e sugestões ao original deste artigo.