

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

ESTUDO DA DINÂMICA ATMOSFÉRICA SUBTERRÂNEA
NA DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA TURÍSTICA
NA CAVERNA DE SANTANA (PETAR, IPORANGA-SP)

Heros Augusto Santos Lobo

unesp 

Rio Claro (SP)
2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

**ESTUDO DA DINÂMICA ATMOSFÉRICA SUBTERRÂNEA
NA DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA
TURÍSTICA NA CAVERNA DE SANTANA (PETAR,
IPORANGA-SP)**

HEROS AUGUSTO SANTOS LOBO

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre de Jesus Perinotto

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo César Boggiani (GSA/IGc – USP)

Tese de Doutorado elaborada junto ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente – área de concentração Planejamento e Gestão do Meio Físico –, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro (SP)
2011

551.44 L799e Lobo, Heros Augusto Santos
Estudo da dinâmica atmosférica subterrânea na determinação da capacidade de carga turística na Caverna de Santana (PETAR, IPORANGA-SP) / Heros Augusto Santos Lobo. - Rio Claro : [s.n.], 2011
392 f. : il., figs., gráfs., tabs., quadros, fots., mapas + 4 Planilhas; Autorização

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: José Alexandre de Jesus Perinotto
Co-Orientador: Paulo César Boggiani

1. Espeleologia. 2. Espeleoturismo. 3. Geoconservação. 4. Gestão do turismo. 5. Microclima. 6. Planejamento turístico. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Paulo César Boggiani – Co-orientador
(USP – Instituto de Geociências)

Prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim
(Unesp – IGCE/ Rio Claro)

Prof. Dr. João Afonso Zavattini
(Unesp – IGCE/Rio Claro)

Prof. Dr. Ivo Karmann
(USP – Instituto de Geociências)

Dr. William Sallun Filho
(Instituto Geológico – SMA/SP)

Aluno – Heros Augusto Santos Lobo

Rio Claro, 21 de Novembro de 2011

Resultado: Aprovado

Dedicatória

À Silmara e ao Guilherme, esposa e filho,
que tiveram parte dos valiosos e
maravilhosos momentos familiares privados
de minha companhia, para que este trabalho
se concretizasse.

Agradecimentos

Deve-se colocar a razão acima da fé? Ou devemos acreditar apenas naquilo que temos provas, como bons cientistas?

À despeito destas questões, e do tradicional embate entre crença e fato, agradeço primeiramente a Deus, pois nele confio e dele dependo.

À CAPES e ao CNPq, pelas bolsas de estudo que financiaram parcialmente o desenvolvimento da pesquisa de doutorado.

Devo gratidão à família, com especial destaque à minha esposa, Silmara, companheira de jornadas subterrâneas e de vida; ao meu filho, Guilherme, que nasceu com a “opção” de gostar de cavernas; à minha mãe, Rejane, que nestes anos de trabalho, aprendeu a gostar ao menos do PETAR; e ao meu tio, Renato, que me incentivou em meus primeiros passos de “caverneiro”, há quase 16 anos atrás.

Na academia estabeleci outra família, formada por uma série de pais e irmãos. Considero como pais os meus professores: José Alexandre de Jesus Perinotto, Paulo César Boggiani, Paulo Milton Barbosa Landim, Ivo Karman, João Afonso Zavattini, Leandro Eugênio da Silva Cerri, Dimas Dias-Britto e Antonio Roberto Saad, que em diferentes graus e níveis de interferência, foram verdadeiros professores e me ensinaram a conhecer e continuar curioso para buscar mais. Dos irmãos, destaco aqueles com quem mais convivi: Patrick, Alessandra, Frederico Gradella, Beatriz, Felipe e César, colegas que me ajudaram de diversas formas, tornando as jornadas em Rio Claro, longe da família, menos pesadas e enfadonhas. Agradeço também aos técnicos de laboratório, sem os quais algumas das análises realizadas não seriam possíveis: Isaac J. Sayeg e Sandra Andrade, ambos do IGc/USP. E à Rosângela Vacello, nossa secretária da pós-graduação, que sempre me ajudou e tratou com carinho e respeito.

No PETAR, o apoio de diversas pessoas, comprometidas com a conservação das cavernas e seu uso sustentável, fez da pesquisa de campo um momento prazeroso e mais fácil. Aos colegas Fábio, Tadeu, Modesto, Simone, Anésio e Carlos, funcionários do PETAR, ficam parte dos créditos de desenvolvimento dos trabalhos de campo. Também aos monitores locais, em especial Vandir Júnior, Renato, Tatiane e Jacques, que auxiliaram diretamente em diversos momentos da coleta de dados. E no fim do dia, nada como chegar às pousadas e ter uma

“comidinha” quentinha esperando... Agradeço a toda equipe das pousadas Tatú, da Idati, da Diva e do Abílio, que me abrigaram e acolheram como parte de suas famílias, nestes quatro anos de trabalho.

Por fim, agradeço aos amigos que colaboraram diretamente nos meus trabalhos, por meio de discussões, objeções, apoio ou mesmo companheirismo em campo: Maurício de A. Marinho, Luiz Gustavo P. Machado “Hawk”, José A. B. Scaleante “Scala”, Marcelo A. Rasteiro, Linda Gentry El-Dash, Luiz Afonso V. de Figueiredo, Beroaldo L. Sobrinho, José Ayrton Labegalini, Eleonora Trajano, Maria Elina Bichuette, William Sallun Filho – com especial destaque para suas valiosas contribuições na banca de qualificação da tese –, José Antônio Ferrari, Simone Alberigi, Roberto Tavares e Mikail. Assim como às instituições que cederam mapas para o desenvolvimento da pesquisa: GPME (Grupo Pierre Martin de Espeleologia) e GGEO/USP (Grupo de Espeleologia da Geologia USP).

Sem a ajuda de todas estas pessoas e instituições, além de muitas outras que, provavelmente, esqueci de citar, tenho por certo que este trabalho não seria possível.

O homem, as viagens

O homem, bicho da Terra tão pequeno
chateia-se na Terra
lugar de muita miséria e pouca diversão,
faz um foguete, uma cápsula, um módulo
toca para a Lua
desce cauteloso na Lua
pisa na Lua
planta bandeirola na Lua
experimenta a Lua
coloniza a Lua
civiliza a Lua
humaniza a Lua.

Lua humanizada: tão igual à Terra.
O homem chateia-se na Lua.
Vamos para Marte - ordena a suas máquinas.
Elas obedecem, o homem desce em Marte
Pisa em Marte
experimenta
coloniza
civiliza
humaniza Marte com engenho e arte.

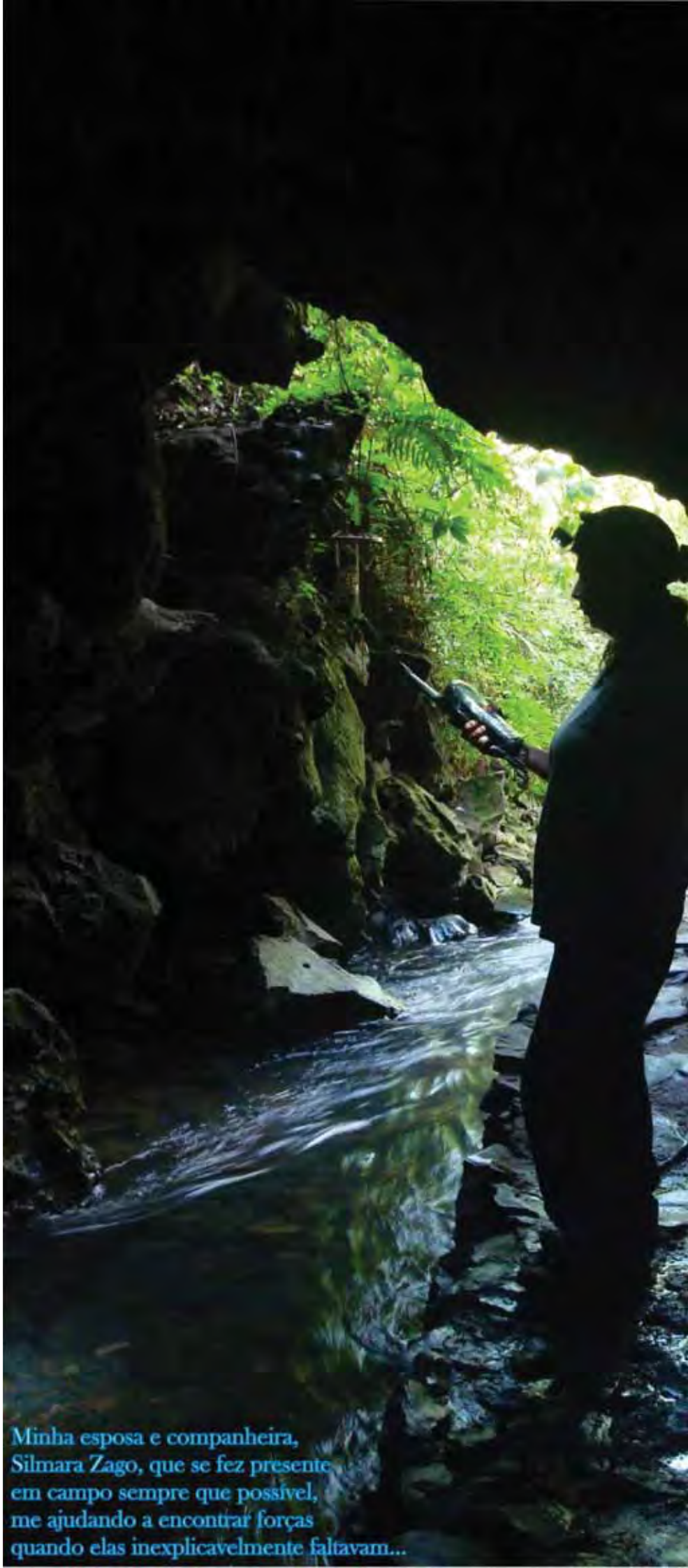
Marte humanizado, que lugar quadrado.
Vamos a outra parte?
Claro - diz o engenho
sofisticado e dócil.
Vamos a Vênus.
O homem põe o pé em Vênus,
Vê o visto - é isto?
idem
idem
idem

O homem funde a cuca se não for a Júpiter
proclamar justiça junto com injustiça
repetir a fossa
repetir o inquieto
repetitório.

Outros planetas restam para outras colônias.
O espaço todo vira Terra-a-terra.
O homem chega ao Sol ou dá uma volta
só para tever?
Não-vê que ele inventa
roupa insidável de viver no Sol.
Põe o pé e
mas que chato é o Sol, falso touro
espanhol domado.

Restam outros sistemas fora
do solar a col-
onizar.
Ao acabarem todos
só resta ao homem
(Estará equipado?)
a difícilíssima e perigosíssima viagem
de si a si mesmo:
pôr o pé no chão
do seu coração
experimentar
colonizar
humanizar
o homem
descobrir em suas próprias inexploradas entranhas
a perene, insuspeitada alegria
de con-viver.

Carlos Drummond de Andrade



Minha esposa e companheira,
Silmara Zago, que se fez presente
em campo sempre que possível,
me ajudando a encontrar forças
quando elas inexplicavelmente faltavam...

Resumo

O manejo do turismo em cavernas é um procedimento de organização do uso do espaço cavernícola, visando resguardar sua integridade e, simultaneamente, possibilitar o seu conhecimento e fruição. Em níveis mundiais, este tipo de procedimento vem sendo desenvolvido com base em parâmetros científicos, tendo na capacidade de carga turística um de seus principais enfoques. Todavia, os métodos para a determinação de capacidade de carga existentes, ou atendem apenas a situações muito específicas – como as cavernas que abrigam pinturas rupestres –, ou foram adaptados de situações análogas de manejo turístico em áreas naturais – como trilhas –, o que dificulta a inserção das especificidades do ambiente subterrâneo na obtenção de limites adequados de uso. Partindo deste cenário, foi realizada uma pesquisa de determinação de capacidade de carga na caverna de Santana (Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira, Iporanga-SP), com base no estudo de sua dinâmica atmosférica. Para tanto, foram executadas três fases de monitoramento espeleoclimático, além de procedimentos complementares de análise de vetores atmosféricos de dispersão e acúmulo e da interação entre atmosfera e rocha. Quanto aos dados monitorados, a média anual (2009-2010) da temperatura do ar no ambiente externo foi de 19,99 °C e a moda foi 17,9 °C. Os extremos registrados foram entre 32,9 °C (máxima, na estação Externa) e 6,1 °C (mínima, na estação Boca). A máxima no período mais chuvoso foi de 32,9 °C e a mínima de 13,8 °C. No período menos chuvoso, que coincide nesta região com o inverno, a máxima registrada foi de 29,4 °C e a mínima de 6,1 °C. A maior diferença, no entanto, se revelou na média, sendo de 21,35 °C no período mais chuvoso (verão) e de 18,06 °C no período menos chuvoso (inverno). A umidade relativa média foi de 98,9%, sendo a máxima de 99,9% e a mínima de 60,2%. No ambiente interno, tomando por base a estação Rio III, a 300 m de distância do acesso ao meio externo – a qual não apresentou interferências da visitação –, a temperatura mínima registrada foi de 17,3 °C, e a máxima de 19,3 °C. A média anual foi de 18,28 °C e a moda 18,1 °C. As diferenças nas médias entre períodos mais e menos chuvoso foram inferiores a 0,5 °C. Neste ponto, a umidade relativa do ar foi constante em todo o período monitorado, no valor de 99,9%, sendo que as variações na saturação hídrica no interior da caverna só ocorreram até a estação Rio II, a 200 m do meio externo. Tais resultados, em conjunto com os demais dados de monitoramento, perfis atmosféricos e análises de fluxos de ar, permitiram a identificação de distintas zonas internas com níveis escalonados de fluxo de energia e massa, permitindo a classificação do padrão atmosférico da caverna de Santana como uma armadilha para a captura de ar quente. Também foi possível a identificação de dois pontos críticos no circuito de visitação, os salões do Cristo e do Encontro. Nestes locais, foram registrados impactos antrópicos associados à elevação da temperatura em até 1,3 °C e do CO₂ em até 150 ppm. Também foram confirmados os impactos da queima do acetileno nas carbureteiras, que gera humo, o qual se deposita nos espeleotemas e rochas. Além disso, foram encontradas outras evidências de impactos nos espeleotemas, como corpos estranhos, material biológico e desagregação mecânica. A partir da análise dos resultados, foi possível identificar a baixa linearidade existente entre os impactos térmicos e a quantidade de visitantes. Com isso, elaborou-se um procedimento de capacidade de carga espeleoturística (CCC_T), centrado no tempo máximo de permanência de grupos em pontos específicos de uma caverna, delimitados em função de limites de acúmulo e dispersão das alterações registradas nos fatores críticos analisados. Para a caverna

de Santana, o uso da temperatura do ar como fator crítico de análise permitiu a identificação de uma capacidade de carga espeleoturística máxima de 1344 visitas/dia. Dentro deste limite, foi sugerida a adoção de um limite inicial de 378 visitas/dia para finais de semana e feriados, em grupos de até 18 pessoas, e de 336 visitas/dia em dias úteis, divididos em grupos de até 24 pessoas. Os intervalos de entrada sugeridos para os grupos foram de 20min em finais de semana e feriados e de 30min em dias úteis. As conclusões evidenciam a necessidade de trabalhar a capacidade de carga de forma flexível, visando a identificação de limites mais adequados de uso para cada caso. Assim, a metodologia proposta e testada não remete à limitação fixa dos volumes de visitação, mas sim, a um intervalo dinâmico, em acordo com as respostas obtidas em testes de campo. Estas podem ser diferentes em função da sazonalidade climática e turística, gerando níveis distintos de capacidade de carga espeleoturística para cada época do ano ou temporada de visitação. Por fim, concluiu-se que a identificação dos limites temporais aceitáveis de alterações nos parâmetros ambientais atmosféricos e sua relação com a capacidade de resiliência e manutenção do estado estacionário das diferentes zonas atmosféricas de uma caverna, permitem a obtenção da capacidade de carga espeleoturística, conferindo uma base racional ao manejo turístico em cavernas.

Palavras-chave: Espeleoturismo; Geoconservação; Gestão do Turismo; Microclima; Planejamento Turístico.

STUDY OF THE DYNAMICS OF THE SUBTERRANEAN ATMOSPHERE IN THE DETERMINATION OF CARRYING CAPACITY OF SHOW CAVES (CCSC): CASE STUDY IN THE CAVE OF SANTANA (PETAR – IPORANGA, SP – BRAZIL)

Abstract

The management of tourism in caves is a procedure which aims to guarantee the cave integrity in a long term basis and, simultaneously, make feasible its sustainable use. In many countries, these procedures have been developed based on scientific parameters and methods, considering the tourist carrying capacity as one of its main focus. However, the existent methods used to determinate the carrying capacity are used just for some specific situations (e.g. the caves which shelter rock art or were adapted from other kind of tourist attractions, as trails and pathways), which difficult the insertion of each cave environment specificities in the procedures of obtaining the carrying capacity. Starting with this scenario, a research was carried out in the cave of Santana (State Tourist Park of Upper Ribeira River – PETAR – Iporanga city, State of São Paulo, southeast of Brazil) to determinate its tourist carrying capacity using the cave atmosphere dynamics. Three phases of speleoclimate monitoring were made, besides of complementary procedures to the analysis of the air flow and its pattern of accumulation and dispersion, together with the interaction between air, rock and water temperature. The annual mean in the period 2009-2010 of air temperature in the external environment was 19,99 °C, and the mode was 17,9 °C. The extreme values were 32,9 °C and 6,1 °C in the external area of the cave. Considering the absence of a drought period in the region, the maximum temperature in the rainy season (south hemisphere summer) was 32,9 °C and the minimum registered was 13,8 °C. In the less rainy season (south hemisphere winter), the maximum and minimum values were, respectively, 29,4 °C and 6,1 °C. The biggest difference, however, was in the mean: 21,35 °C in the summer and 18,06 °C in the winter. The mean of the relative humidity in the external environment was 98,9% (range: 99,9% - 60,2%). In the internal environment, considering a monitoring station out of the tourist area of the cave, located 300 m far from the entrance, the values of the air temperature were between 19,3 °C and 17,3 °C. The central trend measurements were, respectively, 18,28 °C (mean) and 18,1 °C (mode). The differences in the summer and winter seasons were less than 0,5 °C at this point of the cave. The relative humidity is constant in 99,9%, but some small variations in the relative humidity occurred as far as 200 m from the external environment. These results, together with other monitoring data, as also the atmospheric profiles (temperature, relative humidity, CO₂ and atmospheric pressure) and the air flow analysis, allowed the identification of distinct areas of the cave atmosphere, with particular levels of mass and energy flow. In a first approach, the speleoclimate of cave of Santana was classified as a warm trap. Moreover, the research led to the identification of two critical points in the tourist zone of the cave: the salão do Cristo and the salão do Encontro. In these rooms, anthropic impacts in the atmosphere were registered, in a magnitude of 1,3 °C to the temperature, as well as 150ppm to the CO₂. The impacts of the acetylene burning (the old practice of using carbide lights) were confirmed, as also other types of lint in the SEM analysis of speleothems samples. The integrated analysis of all results allowed the identification of an absence of linearity between the thermal impacts and the amount of visitors (per group or per day). Based on this, a new procedure of carrying capacity of show caves (CCSC) was developed centered in the maximum visitation time allowed in

specific critical points of a cave. In the case of cave of Santana, the air temperature was used as the critical factor, which results in a maximum CCSC of 1,344 visitors/day. Within this limit, was suggested the initial limit of 378 visitors/day, divided in groups of up to 18 persons, during the weekends and holidays. To the other days, the suggestion is to diminish this limit to 336 visitors/day, in groups of up to 24 persons. The time interval between groups to these two situations is, respectively, 20min and 30min. The conclusion raises up the necessity of to use the tourist carrying capacity in a flexible basis, aiming the identification of appropriate limits of use for each case and in different conditions – even in a same cave. Therefore, the CCSC never refers to a fixed number of visitors in a cave, but concerns to a dynamic interval, in accordance with the continuous answer of the monitoring procedures. These answers will be always different due to the climatic and tourist demand variations, generating a range of tourist carrying capacity for each season (climatic, tourist, social and other seasonal parameters). Lastly, the study concluded that the identification of acceptable limits in the time basis, of the variation of speleoclimatic parameters, and its relationship to the resilience capacity and maintenance of the steady state of various atmospheric areas of a cave, allow the achievement of the show cave carrying capacity (CCSC), giving a rational basis to the management of the tourism in caves.

Keywords: Speleotourism; Geoconservation; Microclimate; Show Caves Management; Tourist Planning.

Lista de Figuras

<p>FIGURA 2.1 – EXEMPLOS BRASILEIROS DE FORMAS EXOCÁRSTICAS: A) <i>POLJE</i> DO SUMIDOURO, DEPRESSÃO SUAVE QUE FORMA A LAGOA DO SUMIDOURO, EM LAGOA SANTA-MG; B) RELEVO EXUMADO, FORMADO POR TORRES RUINIFORMES EM PLANÍCIE CÁRSTICA EM BURITINÓPOLIS-GO; C) TUFAS CALCÁRIAS ATIVAS, NA RESSURGÊNCIA DA GRUTA DO URUBU-REI, EM BODOQUENA-MS; D) SUMIDOURO DO JOÃO BAIO, NO SISTEMA CÁRSTICO JOÃO RODRIGUES, SÃO DESIDÉRIO-BA; E) DOLINA FORMADA PELO COLAPSO, CONHECIDA COMO BURACO DAS ARARAS, EM FORMOSA-GO; F) <i>MICROKARREN</i>, PEQUENOS LAPIÁS DE DISSOLUÇÃO, EM BURITINÓPOLIS-GO _____</p>	11
<p>FIGURA 2.2 – MODELO CONCEITUAL ILUSTRANDO A RELAÇÃO ENTRE ESPELEOTEMAS E DIVERSOS FATORES, DOS QUAIS O GRADIENTE ESPELEOCLIMÁTICO É SUBSTANCIAL PARA A SUA ALTERAÇÃO: TUFAS MAIS PRÓXIMAS ÀS ENTRADAS E ESTALACTITES NAS ZONAS MAIS PROFUNDAS. O ESQUEMA ILUSTRA A DIVERSIDADE DE MORFOLOGIAS, NÃO A PROGRESSÃO DE SUA GÊNESE (TABOROSI ET AL., 2005) _____</p>	13
<p>FIGURA 2.3 – ALGUNS ESPELEOTEMAS EM CAVERNAS BRASILEIRAS: A) CRISTAL INDIVIDUAL DE SEGUNDA ORDEM, TIPO ESQUELETO, EM PONTA DE ESTALACTITE NA CAVERNA DE SANTANA, EM IPORANGA-SP; B) CRISTAL AGREGADO DE PRIMEIRA ORDEM, TIPO CORALITO, NA CAVERNA AZUIAS, EM IPORANGA-SP; C) CRISTAL AGREGADO DE PRIMEIRA ORDEM, TIPO CORALITO, EM FORMA DE BOLHA, NA GRUTA DOS TÚNEIS, EM LAGOA SANTA-MG; D) CRISTAS AGREGADOS DE PRIMEIRA ORDEM, TIPO AGREGADOS INTERATIVOS, AS HELICTITES NO SALÃO ERECTUS, NA CAVERNA DO DIABO, EM ELDERADO-SP; E) <i>KORAS</i>, OU AGREGADOS, AS COLUNAS NA GRUTA DO URUBÚ-REI, EM BODOQUENA-MS; E F) COMBINAÇÃO ENTRE ASSOCIAÇÃO DE <i>KORAS</i>, UM CONJUNTO COM ESTALACTITE, ESCORRIMENTOS E FLORES, NO SALÃO DAS FLORES, EM IPORANGA-SP _____</p>	15
<p>FIGURA 2.4 – DISTRIBUIÇÃO DAS ROCHAS CARBONÁTICAS E CAVERNAS NO BRASIL (KARMANN; SALLUN FILHO, 2007) _____</p>	17
<p>FIGURA 3.1 – REGIME TÉRMICO DE UMA CAVERNA COM UMA ÚNICA ENTRADA NA REGIÃO LESTE DO MEDITERRÂNEO. ADAPTADO DE GEIGER (1961) E BAILEY (2005) _____</p>	24
<p>FIGURA 3.2 – MODELO CONCEITUAL, SEM ESCALA E COM EXAGERO VERTICAL EM A E B, ILUSTRANDO EM CORTES TRANSVERSAIS DIFERENTES PADRÕES DE CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA SUBTERRÂNEA. EM A E B, CAVERNAS TIPO “SACO DE AR”, SENDO A – ARMADILHA PARA O AR FRIO; E B – ARMADILHA PARA O AR QUENTE. OS EXEMPLOS C E D REFEREM-SE A CAVERNAS COM MAIOR DINÂMICA ATMOSFÉRICA, SENDO C UM MODELO DE CIRCULAÇÃO POR DIFERENÇA DE TEMPERATURA E D DE CAVERNAS BAROMÉTRICAS _____</p>	25
<p>FIGURA 3.3 – VARIAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO AR EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA (STRAHLER, 1971) _____</p>	33
<p>FIGURA 3.4 – MODELO TEÓRICO DA RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DO AR E A PRESSÃO DO VAPOR ILUSTRANDO AS MUDANÇAS NA ATMOSFERA SUBTERRÂNEA EM FUNÇÃO DA VISITAÇÃO (DOMÍNGUEZ-VILLAR ET AL., 2010) _____</p>	34
<p>FIGURA 3.5 – DIAGRAMA DE REAÇÕES QUÍMICAS (LINHAS CONTÍNUAS) E TRANSPORTE DE MOLÉCULAS (LINHAS PONTILHADAS) DURANTE O PROCESSO DE DISSOLUÇÃO (DREYBRODT, 2004B) _____</p>	36
<p>FIGURA 3.6 – ILUSTRAÇÃO CONCEITUAL SIMPLIFICADA DE UM PROCESSO DE CORROSÃO POR CONDENSAÇÃO _____</p>	38
<p>FIGURA 3.7 – PLANTA BAIXA SEM ESCALA, COM A DIREÇÃO DOS FLUXOS DE AR NA CAVERNA CARLSBAD, EUA, INFERIDA POR MEIO DA ORIENTAÇÃO DIRECIONAL DE ESPELEOTEMAS TIPO PIPOCA (QUEEN, 1981) _____</p>	42
<p>FIGURA 3.8: A – GRUTA DA MARRECA, APRESENTANDO PLANTA BAIXA E ESQUEMA BÁSICO DE CIRCULAÇÃO DE AR EM CORTE TRANSVERSAL EM SEU INTERIOR (ASSUNÇÃO, 1976); B – ABISMO DE FURNAS, COM ANOTAÇÕES DE TEMPERATURA DO AR ESTRATIFICADAS VERTICALMENTE (SLAVEC, 1976B) _____</p>	45
<p>FIGURA 4.1 – EXEMPLOS QUE EVIDENCIAM O POTENCIAL GEOTURÍSTICO DAS PAISAGENS CÁRSTICAS. A) TRAVERTINOS A CÉU ABERTO DE PAMUKKALE, NA TURQUIA, FORMADOS POR ÁGUAS TERMAIS. O CONJUNTO TODO É TOMBADO PELA UNESCO, EM CONJUNTO COM A HIERÁPOLIS DE FRIGGIA, CIDADE ROMANA CONSTRUÍDA NO ALTO DA COLINA ONDE ESTÃO OS TRAVERTINOS; B) ALPES AUSTRIACOS EM ROCHAS CARBONÁTICAS NA REGIÃO DE WERFEN (SALZBURG), COM TRILHA DE ACESSO À CAVERNA EISREISENWELT, UMA DAS MAIS VISITADAS DO MUNDO; C) ARENITOS RUINIFORMES DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA, NO PARANÁ, UMA REGIÃO DE CARSTE SUBJACENTE (SALLUN FILHO; KARMANN, 2007); D) MIRANTE COM VISTA PARA A POLJÉ DO SUMIDOURO, NO PARQUE ESTADUAL DO SUMIDOURO, EM LAGOA SANTA, MINAS GERAIS; E) UM DOS MIRANTES DA TRILHA DO SILÚ, NO PARQUE NACIONAL CAVERNAS DO PERUAÇU, MINAS GERAIS. A REGIÃO FIGURA NA LISTA DE POSTULANTES A PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO MUNDIAL DA UNESCO (WILLIAMS, 2008); F) CACHOEIRAS FORMADAS POR TUFAS CARBONÁTICAS E ÁGUAS LÍMPIDAS NO CÔRREGO SANTA MARIA, NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA BODOQUENA, MATO GROSSO DO SUL. _____</p>	56

FIGURA 4.2 – DIVISÃO HIPOTÉTICA DAS ATIVIDADES HUMANAS EM CAVERNAS, CATEGORIZADAS CONFORME O PREDOMÍNIO DAS PRÁTICAS REALIZADAS. ADAPTADO DE FIGUEIREDO (2010)	59
FIGURA 4.3 – ESQUEMA GERAL DE CAUSA E EFEITO DA VISITAÇÃO NO AMBIENTE DA CAVERNA MARVELS, ESPANHA (PULIDO-BOSCH ET AL., 1997)	62
FIGURA 4.4 – IMAGENS DE MEV DE ESPELEOTEMAS DA CAVERNA MARVELS, ESPANHA (PULIDO-BOSCH ET AL., 2007, P. 147-148)	63
FIGURA 4.5 – EXEMPLOS DE INTERAÇÃO ORGÂNICA EM ROCHAS CARBONÁTICAS (GORBUSHINA, 2007).	64
FIGURA 4.6 – PLANTA BAIXA ILUSTRANDO O CAMINHAMENTO ATUAL E PROPOSTO PARA A GRUTA DO LAGO AZUL. ADAPTADO DE UFMS (2002)	68
FIGURA 4.7 – SUPERFÍCIES DE TENDÊNCIA PARA TRÊS EPISÓDIOS TEMPORAIS NA GRUTA DO PENHASCO, COM OS IMPACTOS NO AUMENTO DAS TEMPERATURAS NOS DIAS 30 E 30.07.2008 (LOBO; ZAGO, 2010)	69
FIGURA 4.8 – DIAGRAMA DE IMPACTOS AMBIENTAIS DE EVENTOS CULTURAIS NA GRUTA DO MORRO PRETO E HIPÓTESES DE NEXO CAUSAL DE INTERFERÊNCIAS NO AMBIENTE CAVERNÍCOLA (LOBO; ZAGO, 2009)	70
FIGURA 4.9 – EXEMPLOS DE CAVERNAS TURÍSTICAS COM ESTRUTURA DE VISITAÇÃO NO EXTERIOR: <i>EISREISENWELT</i> , EM WERFEN, NA ÁUSTRIA, UMA DAS POUCAS CAVERNAS TURÍSTICAS DO MUNDO COM GELO PERENE EM SEU INTERIOR. ALÉM DAS BENFEITORIAS DE ACESSO, UMA DE SUAS CARACTERÍSTICAS É O USO DE CARBURETEIRAS DE MÃO DURANTE A VISITAÇÃO, POR ALGUNS DOS TURISTAS (A), ALÉM DE ILUMINAÇÃO QUÍMICA A BASE DE MAGNÉSIO, UTILIZADA PELOS GUIAS PARA SUAS EXPLANAÇÕES (B); <i>DEMANOVSKA CAVE OF LIBERTY</i> , NAS MONTANHAS TATRA, EM LIPTOVSKY MIKULAS, NA ESLOVÁQUIA, ONDE SÃO FEITAS APRESENTAÇÕES MUSICAIS COM CANTORES LÍRICOS ACOMPANHADOS DE UM MAESTRO TECLADISTA, EM EVENTOS ESPECIAIS (C). NA MESMA CAVERNA, ALÉM DAS BENFEITORIAS DE VISITAÇÃO, COMO PASSARELAS, GUARDA-CORPOS E CORRIMÃOS, DESTAQUE PARA A ESTRUTURA EM TELA DE ARAME GALVANIZADO PARA A PROTEÇÃO DOS ESPELEOTEMAS NO TETO (D); CUEVA VILLARICA, PUCÓN-CHILE, COM ESTRUTURAS RÚSTICAS EM MADEIRA (E) E PROFUSÃO DE LUZES COLORIDAS EM SEU INTERIOR (F).	71
FIGURA 4.10 – EXEMPLOS DE CAVERNAS TURÍSTICAS COM ESTRUTURA DE VISITAÇÃO NO BRASIL: CAVERNA DO DIABO, EL Dorado-SP, COM BENFEITORIAS EM CONCRETO (A) E ILUMINAÇÃO DE CAMINHAMENTO (B), ENQUANTO SEU NOVO PROJETO ELÉTRICO NÃO É IMPLANTADO; GRUTA REI DO MATO, SETE LAGOAS-MG, EM DUAS FASES DE SUA ILUMINAÇÃO, A ANTIGA (C) E O NOVO SISTEMA (D), QUE EMBORA USE LÂMPADAS DE LED, ESTRAPOLA NOS TONS COLORIDOS, ARTIFICIALIZANDO DEMASIADAMENTE O AMBIENTE; GRUTA DE MAQUINÉ, CORDISBURGO-MG, JÁ COM SEU NOVO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO EM LED, COM CORES MAIS NEUTRAS, PERMITINDO A VISUALIZAÇÃO DA CAVERNA EM SUAS NUANÇAS DE CORES NATURAIS; GRUTA DE SÃO MIGUEL, BONITO-MS, COM LÂMPADAS FLUORESCENTES, QUE APRESENTAM ALGUMAS DESVANTAGENS (RISCOS DE IMPACTOS POR GASES E MAIOR CALOR) DO QUE OS LEDs.	72
FIGURA 4.11 – MODELO CONCEITUAL PARA O MANEJO DE CAVERNAS (CIGNA; FORTI, 1988)	75
FIGURA 4.12 – EXEMPLOS DE MAPAS DE FRAGILIDADE QUE COMPÕEM O MÉTODO DA CAPACIDADE DE CARGA PROVISÓRIA DE LOBO ET AL. (2010B), NA GRUTA DO ALAMBARI DE BAIXO, IPORANGA-SP (FUNDAÇÃO FLORESTAL; EKOS BRASIL, 2010). A FIGURA ILUSTRA OS TRÊS MAPAS TEMÁTICOS DE FRAGILIDADE PRODUZIDOS (MEIO FÍSICO, MICROCLIMA E ESPELEOBIOLOGIA), BEM COMO SEUS PRODUTOS COMPOSTOS: O MAPA DE FRAGILIDADES MÁXIMAS, QUE ILUSTRA A MAIOR FRAGILIDADE INDICADA POR ÁREA DE CAVERNA A PARTIR DOS MAPAS TEMÁTICOS; E O MAPA DE FRAGILIDADE MÉDIA PONDERADA, QUE É OBTIDO A PARTIR DA SOMATÓRIA E POSTERIOR DIVISÃO DOS VALORES ASSOCIADOS A CADA UMA DAS ZONAS DE FRAGILIDADE DOS MAPAS TEMÁTICOS.	88
FIGURA 5.1 – LOCALIZAÇÃO DA CAVERNA DE SANTANA EM RELAÇÃO AOS CARBONATOS DO SUPERGRUPO AÇUNGUI, AO PETAR E AOS MUNICÍPIOS DO VALE DO RIBEIRA	91
FIGURA 5.2 – GEOLOGIA DA REGIÃO ENTRE OS MUNICÍPIOS DE APIAÍ E IPORANGA, ENGLOBALANDO AS FORMAÇÕES DO SUBGRUPO LAJEADO	93
FIGURA 5.3 – DELIMITAÇÃO EM SUPERFÍCIE DO SISTEMA CÁRSTICO PÉROLAS-SANTANA E SUAS CONEXÕES HIDROLÓGICAS COM OS SISTEMAS GRILO E ZEZO	95
FIGURA 5.4 – LOCALIZAÇÃO DA CAVERNA DE SANTANA E DETALHE DAS GALERIAS COM VISITAÇÃO TURÍSTICA E ADJACÊNCIAS IMEDIATAS	97
FIGURA 5.5 – TRECHOS DA CAVERNA DE SANTANA: A) ENTRADA DA CAVERNA, PELA RESSURGÊNCIA DO RIO RONCADOR; B) RIO RONCADOR EM DIAS DE CHUVA, COM ALAGAMENTO PARCIAL QUE OCORRE EM TODA A GALERIA; C) TRECHO A MONTANTE DO RIO, ILUSTRANDO A FORMAÇÃO DO CONDUTO EM AMBIENTE VADOSO E AS PASSARELAS CONSTRUÍDAS PARA A VISITAÇÃO	

	TURÍSTICA; D) SALÃO DO CRISTO, COM DIVERSAS ESTALACTITES, ESTALAGMITES E COLUNAS; E E F) TRECHOS DA GALERIA DO RIO MORTO, CAVERNA QUE FOI CAPTURADA PELO ENTALHAMENTO VADOSO DA GALERIA PRINCIPAL DO RIO RONCADOR. _____	98
FIGURA 5.6 –	DIVERSAS OCORRÊNCIAS DE ESPELEOTEMAS NA CAVERNA DE SANTANA, MUITAS DELAS, POUCO COMUNS PARA A ÁREA CÁRSTICA DO VALE DO RIBEIRA: A) NINHO DE PÉROLAS EM FORMAÇÃO, NA GALERIA DO RIO MORTO; B) FLORES DE ARAGONITA, DO SALÃO DAS FLORES; C) CORALÓIDES FORMADOS PELA DISSOLUÇÃO DA ROCHA POR MEIO DA CAPILARIDADE INTRAPOROSA ASSOCIADA A EVAPORAÇÃO DE MICROFILMES DE ÁGUA EM SUPERFÍCIE ROCHOSA, NO SALÃO SÃO PAULO; D) JANGADAS DE CALCITA EM PISCINA DE ÁGUA ESTAGNADA, EM GALERIA SUPERIOR INTERMEDIÁRIA; E) CRISTAIS DENTE DE CÃO, EM PEQUENAS REPRESAS DE TRAVERTINOS ATUALMENTE INATIVAS, NO SALÃO SÃO JORGE; F) VULCÕES, ASSOCIADOS AOS TRAVERTINOS INCRUSTADOS DE DENTES DE CÃO, NO SALÃO DOS VULCÕES. _____	99
FIGURA 5.7 –	FOTOS DE EPISÓDIOS ATMOSFÉRICOS DO CLIMA REGIONAL E MICROCLIMA. MIRANTE DA BOA VISTA, COM O RIO BETARI LOCALIZADO AO FUNDO DO VALE DO RIO BETARI, EM UM DIA TÍPICO DA ÉPOCA DE MENOR INCIDÊNCIA DE CHUVAS (A), COM MASSAS DE AR MAIS CONFINADAS NOS FUNDOS DE VALE E VEGETAÇÃO MENOS EXUBERANTE, EM JULHO DE 2009; E NO AUGE DA ÉPOCA DAS CHUVAS (B), EM FEVEREIRO DE 2010. EM SEU FUNDO, O RIO BETARI (C), COM CAMADA NEBULOSA SOBRE SUA CALHA, EM FUNÇÃO DA CONDENSAÇÃO DO AR MAIS DENSO. _____	102
FIGURA 5.8 –	FLUXO ANUAL DE VISITAÇÃO DO NÚCLEO SANTANA DO PETAR. FONTE DE DADOS: MARRA (2001), LOBO (2004) E PETAR/FF (2010). _____	107
FIGURA 5.9 –	FLUXO MENSAL DE VISITAÇÃO NA CAVERNA DE SANTANA- PERÍODO MAIO/2008 – DEZEMBRO/2009. FONTE DE DADOS: PETAR/FF (2010). _____	108
FIGURA 6.1 –	INSTRUMENTOS UTILIZADOS NA PESQUISA: A) TESTOSTOR 175, FIXADO POR MEIO DE ARAME ENCAPADO E PRESILHAS METÁLICAS; B) TESTO 175-H1, FIXADO COM FIO DE NYLON – OPÇÃO DE FIXAÇÃO QUE FOI DESCARTADA APÓS OS TESTES; C) TESTO 177-H1, COM SONDA DE AFERIÇÃO DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE ACOPLADA; D) DETALHE DA PROTEÇÃO DESENVOLVIDA PARA ISOLAR A SONDA, DE FORMA QUE A TEMPERATURA DO AR NÃO INTERFERISSE NAS LEITURAS DE TEMPERATURA DA ROCHA; E) TESTO 435 COM SONDA IAQ EM SUA PRIMEIRA MONTAGEM. A CONDENSAÇÃO NA SUPERFÍCIE DO EQUIPAMENTO LEVOU À ALTERAÇÃO NA POSIÇÃO DA SONDA, BEM COMO NA COLOCAÇÃO DE UMA PROTEÇÃO PLÁSTICA NELA E NO INSTRUMENTO (E). ESTA PROTEÇÃO FOI TESTADA, DE MODO QUE NÃO INTERFERE NA LEITURA DOS RESULTADOS. _____	114
FIGURA 6.2 –	DISTRIBUIÇÃO DOS INSTRUMENTOS NA CAVERNA DE SANTANA NO MONITORAMENTO EXPLORATÓRIO ANUAL _____	115
FIGURA 6.3 –	A) ABRIGO DE CHUVA PARA OS TERMOHIGRÔMETROS EXTERNOS; B) PONTO DE INSTALAÇÃO NA RESSURGÊNCIA DO RIO RONCADOR; C) LAPTOP, USADO PARA DESCARGA DE DADOS <i>IN SITU</i> E OBSERVAÇÃO EM GRÁFICO DOS RESULTADOS OBTIDOS; D E E) LACRES PLÁSTICOS, ARAMES ENCAPADOS E PRESILHAS METÁLICAS, UTILIZADOS PARA A FIXAÇÃO DOS INSTRUMENTOS E CABOS EM CAMPO; F) BATERIAS ½ AA DE 9V, UTILIZADAS NA MAIORIA DOS INSTRUMENTOS DA PESQUISA. _____	116
FIGURA 6.4 –	A) TESTO 175-H2; B) BATERIA (DETALHE) PARA O TESTO 435 E APLICAÇÃO EM CAMPO; C) CONTADOR DE PESSOAS, COM SUA APLICAÇÃO EM CAMPO (D); E E) AFERIDOR DE CO ₂ , COM APLICAÇÃO EM CAMPO (F) _____	118
FIGURA 6.5 –	EPISÓDIOS GERADOS PELO EXCESSO DE UMIDADE E ENCHENTES NA CAVERNA DE SANTANA. A) CONDENSAÇÃO NO TETO E NO INSTRUMENTO (ESTAÇÃO RIO I); B) CONDENSAÇÃO DE ÁGUA NO INTERIOR DO VISOR E COM FUNGOS SE DESENVOLVENDO NA CAIXA DE PROTEÇÃO DO INSTRUMENTO (CÍRCULO VERMELHO); C) NOS PONTOS COM GOTEJAMENTO, OS PROBLEMAS DE EXCESSO DE UMIDADE FORAM RESOLVIDOS COM ABRIGOS IMPROVISADOS COM GARRAFAS PET CORTADAS, SEM ENCOBRIR O SENSOR DE LEITURA; D) RIO RONCADOR COM NÍVEL D'ÁGUA 60 CM ACIMA DO HABITUAL (6 MAR. 2010, ÀS 12H 50MIN); E) ALAGAMENTO EXCEPCIONAL DO SALÃO DO ENCONTRO (7 FEV. 2010, ÀS 16H 55MIN). A FOTO FILUSTRA O MESMO SALÃO EM CONDIÇÕES HABITUAIS. FOTO F: TATIANE V. BARBOSA. _____	119
FIGURA 6.6 –	DISTRIBUIÇÃO DOS INSTRUMENTOS NA CAVERNA DE SANTANA PARA O MONITORAMENTO FINAL _____	121
FIGURA 6.7 –	A) 177-T2 INSTALADO NO SALÃO DAS FLORES, COM FORMAÇÃO DE BORBULHAS NA CARÇAÇA (AZUL), GOTÍCULAS DE CONDENSAÇÃO DE COR ESCURA (AMARELO) E FORMAÇÃO DE FUNGOS NO CABO (VERMELHO); B) 177-H1, NO SALÃO DO ENCONTRO, COM CAPA PROTETORA E SENSORES ARRANCADOS; C) CONTADOR DE PESSOAS, COM COLIMADOR ARRANCADO (VERMELHO) E CONDENSAÇÃO DE ÁGUA NO INTERIOR DO INSTRUMENTO (AMARELO); D) FATO CONSTANTE NA PESQUISA: FORMAÇÃO DE FUNGOS EM CABOS QUE FORAM MANUSEADOS, PROVAVELMENTE EM FUNÇÃO DA LIBERAÇÃO DE PARTÍCULAS ORGÂNICAS NA MÃO ASSOCIADA À SATURAÇÃO HÍGRICA DO AMBIENTE _____	122
FIGURA 6.8 –	DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE PERFILAGEM ATMOSFÉRICA NA CAVERNA DE SANTANA _____	124
FIGURA 6.9 –	LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DE AMOSTRAS DE ESPELEOTEMAS NA CAVERNA DE SANTANA _____	127
FIGURA 7.1 –	LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE MONITORAMENTO NA ZONA TERMOCLIMÁTICA EXTERNA _____	142

FIGURA 7.2 – HISTOGRAMA DAS MÉDIAS MENSIS DE CHUVAS NO PERÍODO 1972-2004, ESTAÇÃO SERRA DOS MOTA (BAIRRO DA SERRA, IPORANGA-SP). FONTE DE DADOS: DAEE (2010)	143
FIGURA 7.3 – HISTOGRAMA DO ACUMULADO ANUAL DE CHUVAS NO PERÍODO 1972-2004, ESTAÇÃO SERRA DOS MOTA (BAIRRO DA SERRA, IPORANGA-SP). FONTE DE DADOS: DAEE (2010)	144
FIGURA 7.4 – MÉDIAS MENSIS DE CHUVA COMPARADAS: PERÍODO 1972-2004; 1983; 1988. FONTE DE DADOS: DAEE (2010)	145
FIGURA 7.5 – SÉRIES SIMPLIFICADAS DA TEMPERATURA DO AR NA ESTAÇÃO EXTERNA, COM MEDIDAS DE DISPERSÃO – MÁXIMA E MÍNIMA – E DE TENDÊNCIA CENTRAL – MODA – PARA O PERÍODO ENTRE 01 DE ABRIL DE 2009 E 31 DE MARÇO DE 2010. OS INTERVALOS SEM REGISTRO, NESTE E NOS PRÓXIMOS GRÁFICOS, DEVEM-SE A PROBLEMAS NO INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO.	147
FIGURA 7.6 – SÉRIES ORIGINAIS DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR (UR) E RESPECTIVAS MÉDIAS MÓVEIS, NA ESTAÇÃO EXTERNA, PARA O PERÍODO ENTRE 1° DE JULHO E 13 DE DEZEMBRO DE 2009	148
FIGURA 7.7 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO DE TODA A SÉRIE SELECIONADA (A) E, EM DETALHE, DAS PRIMEIRAS 500 HORAS (20,8 DIAS) (B) NA ESTAÇÃO EXTERNA	149
FIGURA 7.8 – FUNÇÃO DE DENSIDADE ESPECTRAL DA SÉRIE SELECIONADA NA ESTAÇÃO EXTERNA	149
FIGURA 7.9 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DA ZONA TERMOCLIMÁTICA TRANSICIONAL	151
FIGURA 7.10 – SÉRIES SIMPLIFICADAS DA TEMPERATURA DO AR NA ESTAÇÃO BOCA, COM MEDIDAS DE DISPERSÃO – MÁXIMA E MÍNIMA – E DE TENDÊNCIA CENTRAL – MODA – PARA O PERÍODO ENTRE 1° DE ABRIL DE 2009 E 31 DE MARÇO DE 2010	152
FIGURA 7.11 – SÉRIES ORIGINAIS DE T E UR E RESPECTIVAS MÉDIAS MÓVEIS, NA ESTAÇÃO BOCA, PARA O PERÍODO ENTRE 1° DE OUTUBRO DE 2009 E 31 DE MARÇO DE 2010	153
FIGURA 7.12 – FUNÇÕES DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE SELECIONADA NA ESTAÇÃO BOCA	154
FIGURA 7.13 – SÉRIES SIMPLIFICADAS DA TEMPERATURA DO AR NA ESTAÇÃO RIO I, COM MEDIDAS DE DISPERSÃO – MÁXIMA E MÍNIMA – E DE TENDÊNCIA CENTRAL – MODA – PARA O PERÍODO ENTRE 1° DE ABRIL DE 2009 E 31 DE MARÇO DE 2010	155
FIGURA 7.14 – SÉRIES ORIGINAIS DE T E UR E RESPECTIVAS MÉDIAS MÓVEIS, NA ESTAÇÃO RIO I, PARA O PERÍODO ENTRE 1° DE MAIO E 31 DE SETEMBRO DE 2009	156
FIGURA 7.15 – GRÁFICOS DE RESÍDUOS DA SÉRIE ORIGINAL X MÉDIAS MÓVEIS, NA ESTAÇÃO RIO I, PARA O PERÍODO ENTRE 1° DE MAIO E 31 DE SETEMBRO DE 2009	157
FIGURA 7.16 – FUNÇÕES DE AUTOCORRELAÇÃO (A E B) E DENSIDADE ESPECTRAL (C) DA SÉRIE SELECIONADA NA ESTAÇÃO RIO I	158
FIGURA 7.17 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DA ZONA TERMOCLIMÁTICA INTERNA TÍPICA	160
FIGURA 7.18 – SÉRIES SIMPLIFICADAS DA TEMPERATURA DO AR NA ESTAÇÃO RIO II, COM MEDIDAS DE DISPERSÃO – MÁXIMA E MÍNIMA – E DE TENDÊNCIA CENTRAL – MODA – PARA O PERÍODO ENTRE 1° DE ABRIL DE 2009 E 31 DE MARÇO DE 2010	161
FIGURA 7.19 – SÉRIES ORIGINAIS DE T E UR, SUAS MÉDIAS MÓVEIS (A) E RESPECTIVO GRÁFICO DE RESÍDUOS DA SUAVIZAÇÃO DA SÉRIE ORIGINAL X MÉDIA MÓVEL (B), NA ESTAÇÃO RIO II, PARA O PERÍODO ENTRE 26 DE AGOSTO DE 2009 E 21 DE JANEIRO DE 2010	162
FIGURA 7.20 – FUNÇÕES DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE SELECIONADA NA ESTAÇÃO RIO II	163
FIGURA 7.21 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO PARA A SÉRIE DOS DIAS 1° DE ABRIL/2009 A 3 DE JULHO/2009, NA ESTAÇÃO RIO II	164
FIGURA 7.22 – SÉRIES SIMPLIFICADAS DA TEMPERATURA DO AR NA ESTAÇÃO RIO III, COM MEDIDAS DE DISPERSÃO – MÁXIMA E MÍNIMA – E DE TENDÊNCIA CENTRAL – MODA – PARA O PERÍODO ENTRE 1° DE ABRIL DE 2009 E 31 DE MARÇO DE 2010	165
FIGURA 7.23 – SÉRIES ORIGINAIS DE T E UR, SUAS MÉDIAS MÓVEIS (A) E RESPECTIVO GRÁFICO DE RESÍDUOS DA SUAVIZAÇÃO DA SÉRIE ORIGINAL X MÉDIA MÓVEL (B), NA ESTAÇÃO RIO III, PARA O PERÍODO ENTRE 1° DE ABRIL E 11 DE DEZEMBRO/2009	166
FIGURA 7.24 – FUNÇÕES DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE DE TEMPERATURA DO AR DA ESTAÇÃO RIO III	167
FIGURA 7.25 – SÉRIES SIMPLIFICADAS DA TEMPERATURA DA ÁGUA NA ESTAÇÃO RIO III, COM MEDIDAS DE DISPERSÃO – MÁXIMA E MÍNIMA – E DE TENDÊNCIA CENTRAL – MODA – PARA O PERÍODO ENTRE 1° DE ABRIL DE 2009 E 31 DE MARÇO DE 2010	168
FIGURA 7.26 – SÉRIE ORIGINAL DE T DA ÁGUA E MÉDIA MÓVEL (A), NA ESTAÇÃO RIO III, PARA O PERÍODO ENTRE 1° DE ABRIL E 11 DE DEZEMBRO/2009, E RESPECTIVA FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO (B)	169
FIGURA 7.27 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DA ZONA TERMOCLIMÁTICA DE BAIXA AMPLITUDE TÉRMICA	171
FIGURA 7.28 – SÉRIES SIMPLIFICADAS DA TEMPERATURA DO AR NA ESTAÇÃO FAFÁ, COM MEDIDAS DE DISPERSÃO – MÁXIMA E MÍNIMA – E DE TENDÊNCIA CENTRAL – MODA – PARA O PERÍODO ENTRE 29 DE MAIO DE 2009 E 17 DE JANEIRO DE 2010	172

FIGURA 7.29 – SÉRIE ORIGINAL DE T E MÉDIAS MÓVEIS CORRESPONDENTES (A) E RESPECTIVO GRÁFICO DE RESÍDUOS DA SUAVIZAÇÃO DA SÉRIE ORIGINAL X MÉDIA MÓVEL (B), NA ESTAÇÃO FAFÁ, PARA O PERÍODO ENTRE 29 DE MAIO DE 2009 E 17 DE JANEIRO DE 2010 _____	173
FIGURA 7.30 – FUNÇÕES DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE DE TEMPERATURA DO AR DA ESTAÇÃO FAFÁ _____	174
FIGURA 7.31 – SÉRIES SIMPLIFICADAS DA TEMPERATURA DO AR NA ESTAÇÃO CRISTO, COM MEDIDAS DE DISPERSÃO – MÁXIMA E MÍNIMA – E DE TENDÊNCIA CENTRAL – MODA – PARA O PERÍODO ENTRE 4 DE OUTUBRO DE 2009 E 31 DE MARÇO DE 2010 _____	175
FIGURA 7.32 – SÉRIE ORIGINAL DE T E MÉDIAS MÓVEIS CORRESPONDENTES (A1 E B1) E RESPECTIVOS GRÁFICOS DE RESÍDUOS DA SUAVIZAÇÃO DA SÉRIE ORIGINAL X MÉDIA MÓVEL (A2 E B2), NA ESTAÇÃO CRISTO, PARA OS PERÍODOS ENTRE 5 DE OUTUBRO E 11 DE DEZEMBRO DE 2009 (A1-2) E 25 DE JANEIRO E 31 DE MARÇO DE 2010 (B1-2) _____	176
FIGURA 7.33 – FUNÇÕES DE AUTOCORRELAÇÃO PARA OS PERÍODOS ENTRE 5/10/2009 – 11/12/2009 (A) E ENTRE 25/01/2010 – 31/03/2010 (B) NA ESTAÇÃO CRISTO _____	178
FIGURA 7.34 – FUNÇÕES DE DENSIDADE ESPECTRAL PARA OS PERÍODOS ENTRE 5/10/2009 – 11/12/2009 (A) E ENTRE 25/01/2010 – 31/03/2010 (B) NA ESTAÇÃO CRISTO _____	179
FIGURA 7.35 – SÉRIES SIMPLIFICADAS DA TEMPERATURA DO AR NA ESTAÇÃO ENCONTRO, COM MEDIDAS DE DISPERSÃO – MÁXIMA E MÍNIMA – E DE TENDÊNCIA CENTRAL – MODA – PARA O PERÍODO ENTRE 1º DE ABRIL DE 2009 E 31 DE MARÇO DE 2010 _____	180
FIGURA 7.36 – SÉRIE ORIGINAL DE TEMPERATURA DO AR E MÉDIAS MÓVEIS CORRESPONDENTES (A) E RESPECTIVO GRÁFICO DE RESÍDUOS DA SUAVIZAÇÃO DA SÉRIE ORIGINAL X MÉDIA MÓVEL (B), NA ESTAÇÃO ENCONTRO, PARA O PERÍODO ENTRE 1º DE ABRIL E 4 DE SETEMBRO DE 2009 _____	181
FIGURA 7.37 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E RESPECTIVO DETALHE (B) DA SÉRIE DE TEMPERATURA DO AR DA ESTAÇÃO ENCONTRO _____	182
FIGURA 7.38 – FUNÇÃO DE DENSIDADE ESPECTRAL DA SÉRIE DE TEMPERATURA DO AR DA ESTAÇÃO ENCONTRO _____	183
FIGURA 7.39 – SÉRIES SIMPLIFICADAS DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DE ROCHA NA ESTAÇÃO ENCONTRO, COM MEDIDAS DE DISPERSÃO – MÁXIMA E MÍNIMA – E DE TENDÊNCIA CENTRAL – MODA – PARA O PERÍODO ENTRE 1º DE ABRIL DE 2009 E 31 DE MARÇO DE 2010 _____	184
FIGURA 7.40 – SÉRIE ORIGINAL DE TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DE ROCHA E MÉDIAS MÓVEIS CORRESPONDENTES (A) E RESPECTIVO GRÁFICO DE RESÍDUOS DA SUAVIZAÇÃO DA SÉRIE ORIGINAL X MÉDIA MÓVEL (B), NA ESTAÇÃO ENCONTRO, PARA O PERÍODO ENTRE 1º DE ABRIL DE 2009 E 21 DE JANEIRO DE 2010 _____	185
FIGURA 7.41 – FUNÇÕES DE AUTOCORRELAÇÃO, COMPLETA (A) E EM DETALHE (B), E DE DENSIDADE ESPECTRAL (C) DA SÉRIE DE TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DE ROCHA DA ESTAÇÃO ENCONTRO _____	186
FIGURA 7.42 – SÉRIES SIMPLIFICADAS DA TEMPERATURA DO AR NA ESTAÇÃO ESCADA, COM MEDIDAS DE DISPERSÃO – MÁXIMA E MÍNIMA – E DE TENDÊNCIA CENTRAL – MODA – PARA O PERÍODO ENTRE 1º DE ABRIL DE 2009 E 31 DE MARÇO DE 2010 _____	187
FIGURA 7.43 – SÉRIES SELECIONADAS DE TEMPERATURA DO AR NA ESTAÇÃO ESCADA: SÉRIES SIMPLIFICADAS (A1) E DADOS ORIGINAIS (A2) DO MÊS DE JUNHO/2009; SÉRIES SIMPLIFICADAS DO PERÍODO ENTRE 25 DE AGOSTO – 15 DE OUTUBRO/2009 (B1) E DESTAQUE PARA OS DADOS ORIGINAIS DE SETEMBRO/2009 (B2) _____	188
FIGURA 7.44 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DA ZONA TERMOCLIMÁTICA DE TEMPERATURA ESTÁVEL _____	190
FIGURA 7.45 – COMPARAÇÃO DE SÉRIES MENSIS DE DADOS BRUTOS DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR DO MÊS DE ABRIL/2009 (A) E JANEIRO/2010 (B) NA ESTAÇÃO DISCOS _____	192
FIGURA 7.46 – SÉRIES SIMPLIFICADAS DA TEMPERATURA DO AR NA ESTAÇÃO DISCOS, COM MEDIDAS DE DISPERSÃO – MÁXIMA E MÍNIMA – E DE TENDÊNCIA CENTRAL – MODA – PARA O PERÍODO ENTRE 13 DE DEZEMBRO DE 2009 E 31 DE MARÇO DE 2010 _____	193
FIGURA 7.47 – SÉRIES SIMPLIFICADAS DA TEMPERATURA DO AR NA ESTAÇÃO DISCOS, COM MEDIDAS DE DISPERSÃO – MÁXIMA E MÍNIMA – E DE TENDÊNCIA CENTRAL – MODA – PARA O PERÍODO ENTRE 14 DE DEZEMBRO DE 2009 E 31 DE MARÇO DE 2010 _____	194
FIGURA 7.48 – FUNÇÕES DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE SELECIONADA NA ESTAÇÃO DISCOS _____	194
FIGURA 7.49 – SÉRIES SIMPLIFICADAS DA TEMPERATURA DO AR NA ESTAÇÃO SÃO PAULO, COM MEDIDAS DE DISPERSÃO – MÁXIMA E MÍNIMA – E DE TENDÊNCIA CENTRAL – MODA – PARA O PERÍODO ENTRE 13 DE DEZEMBRO DE 2009 E 31 DE MARÇO DE 2010 _____	195
FIGURA 7.50 – SÉRIES ORIGINAIS DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR NA ESTAÇÃO SÃO PAULO, PARA O PERÍODO ENTRE 22 DE MARÇO E 9 DE ABRIL DE 2010 _____	196

FIGURA 7.51 – HISTOGRAMA DA CHUVA DIÁRIA NO INVERNO DE 2010 NA REGIÃO DA CAVERNA DE SANTANA _____	199
FIGURA 7.52 – SÉRIES ORIGINAIS DA TEMPERATURA (VERMELHO) E UMIDADE RELATIVA DO AR (AZUL) NA ESTAÇÃO EXTERNA, PARA O PERÍODO ENTRE 26 DE JUNHO DE 2010 E 30 DE SETEMBRO DE 2010 _____	200
FIGURA 7.53 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE DA UMIDADE RELATIVA DO AR DA ESTAÇÃO EXTERNA _____	201
FIGURA 7.54 – VARIAÇÃO EM DETALHE DA UMIDADE RELATIVA E TEMPERATURA DO AR NO DIA 04 DE SETEMBRO DE 2010 _____	202
FIGURA 7.55 – SÉRIE ORIGINAL DE TEMPERATURA DO AR E MÉDIAS MÓVEIS CORRESPONDENTES (A) E RESPECTIVO GRÁFICO DE RESÍDUOS DA SUAVIZAÇÃO DA SÉRIE ORIGINAL X MÉDIA MÓVEL (B), NA ESTAÇÃO EXTERNA, PARA O PERÍODO ENTRE 26 DE JUNHO E 30 DE SETEMBRO DE 2010 _____	203
FIGURA 7.56 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE DE TEMPERATURA DO AR DA ESTAÇÃO EXTERNA _____	204
FIGURA 7.57 – SÉRIES ORIGINAIS DA TEMPERATURA (VERMELHO) E UMIDADE RELATIVA DO AR (AZUL) NA ESTAÇÃO BOCA, PARA O PERÍODO ENTRE 27 DE JUNHO DE 2010 E 30 DE SETEMBRO DE 2010 _____	205
FIGURA 7.58 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE DA UMIDADE RELATIVA DO AR DA ESTAÇÃO BOCA _____	206
FIGURA 7.59 – VARIAÇÃO EM DETALHE DA UMIDADE RELATIVA E TEMPERATURA DO AR NO DIA 15 DE AGOSTO DE 2010 _____	207
FIGURA 7.60 – SÉRIE ORIGINAL DE TEMPERATURA DO AR E MÉDIAS MÓVEIS CORRESPONDENTES (A) E RESPECTIVO GRÁFICO DE RESÍDUOS DA SUAVIZAÇÃO DA SÉRIE ORIGINAL X MÉDIA MÓVEL (B), NA ESTAÇÃO BOCA, PARA O PERÍODO ENTRE 27 DE JUNHO E 30 DE SETEMBRO DE 2010 _____	208
FIGURA 7.61 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE DE TEMPERATURA DO AR DA ESTAÇÃO BOCA _____	209
FIGURA 7.62 – SÉRIES ORIGINAIS DA TEMPERATURA (VERMELHO) E UMIDADE RELATIVA DO AR (AZUL) NA ESTAÇÃO RIO II, PARA O PERÍODO ENTRE 27 DE JUNHO DE 2010 E 05 DE SETEMBRO DE 2010 _____	210
FIGURA 7.63 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE DA UMIDADE RELATIVA DO AR DA ESTAÇÃO RIO II _____	211
FIGURA 7.64 – SÉRIE ORIGINAL DE TEMPERATURA DO AR E MÉDIAS MÓVEIS CORRESPONDENTES (A) E RESPECTIVO GRÁFICO DE RESÍDUOS DA SUAVIZAÇÃO DA SÉRIE ORIGINAL X MÉDIA MÓVEL (B), NA ESTAÇÃO RIO II, PARA O PERÍODO ENTRE 27 DE JUNHO E 05 DE SETEMBRO DE 2010 _____	212
FIGURA 7.65 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE DE TEMPERATURA DO AR DA ESTAÇÃO RIO II _____	213
FIGURA 7.66 – SÉRIES ORIGINAIS DA TEMPERATURA (VERMELHO) E UMIDADE RELATIVA DO AR (AZUL) NA ESTAÇÃO RIO III, PARA O PERÍODO ENTRE 27 DE JUNHO DE 2010 E 30 DE SETEMBRO DE 2010 _____	214
FIGURA 7.67 – SÉRIE ORIGINAL DE TEMPERATURA DO AR E MÉDIAS MÓVEIS CORRESPONDENTES NA ESTAÇÃO RIO III, PARA O PERÍODO ENTRE 27 DE JUNHO E 30 DE SETEMBRO DE 2010 _____	215
FIGURA 7.68 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE DE TEMPERATURA DO AR DA ESTAÇÃO RIO III _____	216
FIGURA 7.69 – SÉRIE ORIGINAL DE TEMPERATURA DA ÁGUA E MÉDIAS MÓVEIS CORRESPONDENTES NA ESTAÇÃO RIO III, PARA O PERÍODO ENTRE 27 DE JUNHO E 30 DE SETEMBRO DE 2010 _____	217
FIGURA 7.70 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE DE TEMPERATURA DA ÁGUA DA ESTAÇÃO RIO III _____	218
FIGURA 7.71 – SÉRIES ORIGINAIS DA TEMPERATURA (VERMELHO) E UMIDADE RELATIVA DO AR (AZUL) NA ESTAÇÃO RIO VERDE, PARA O PERÍODO ENTRE 11 DE AGOSTO DE 2010 E 30 DE SETEMBRO DE 2010 _____	219
FIGURA 7.72 – SÉRIE ORIGINAL DE TEMPERATURA DA ÁGUA E MÉDIAS MÓVEIS CORRESPONDENTES NA ESTAÇÃO RIO III, PARA O PERÍODO ENTRE 11 DE AGOSTO E 30 DE SETEMBRO DE 2010 _____	220
FIGURA 7.73 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE DE TEMPERATURA DA ÁGUA DA ESTAÇÃO RIO VERDE _____	221
FIGURA 7.74 – SÉRIES ORIGINAIS DA TEMPERATURA (VERMELHO) E UMIDADE RELATIVA DO AR (AZUL) NA ESTAÇÃO CRISTO, PARA O PERÍODO ENTRE 27 DE JUNHO DE 2010 E 13 DE SETEMBRO DE 2010 _____	222
FIGURA 7.75 – MEDIDAS MENSIS DE TENDÊNCIA CENTRAL E DE DISPERSÃO PARA A ESTAÇÃO CRISTO (JUNHO-SETEMBRO/2010) _____	223

FIGURA 7.76 – SÉRIE ORIGINAL DE TEMPERATURA DO AR E MÉDIAS MÓVEIS CORRESPONDENTES (A) E RESPECTIVO GRÁFICO DE RESÍDUOS DA SUAVIZAÇÃO DA SÉRIE ORIGINAL X MÉDIA MÓVEL (B), NA ESTAÇÃO CRISTO, PARA O PERÍODO ENTRE 27 DE JUNHO E 13 DE SETEMBRO DE 2010	224
FIGURA 7.77 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO (A) E DENSIDADE ESPECTRAL (B) DA SÉRIE DE TEMPERATURA DA ÁGUA DA ESTAÇÃO RIO VERDE	225
FIGURA 7.78 – COMPARAÇÕES ENTRE AS SÉRIES ORIGINAIS ANUAIS: TEMPERATURA EXTERNA X TEMPERATURA DAS ESTAÇÕES BOCA, RIO I, RIO II E RIO III (A) E TEMPERATURA EXTERNA X TEMPERATURA DAS ESTAÇÕES FAFÁ, CRISTO, ENCONTRO E DISCOS (B)	227
FIGURA 7.79 – HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIAS RELATIVAS PARA AS SÉRIES COMPLETAS DE DADOS DE TEMPERATURA	229
FIGURA 7.80 – CORRELOGRAMAS CRUZADOS ENTRE A ESTAÇÃO EXTERNA E SETE ESTAÇÕES INTERNAS, CONSIDERANDO INTERVALOS DE TEMPO DE MONITORAMENTO COINCIDENTE E SEM FALHAS NOS DADOS	231
FIGURA 7.81 – CORRELOGRAMAS CRUZADOS ENTRE AR E ÁGUA NA ESTAÇÃO RIO III (A) E ENTRE AR E ROCHA NA ESTAÇÃO ENCONTRO (B)	232
FIGURA 7.82 – SÉRIES ORIGINAIS DE UMIDADE RELATIVA DO AR COLETADAS NAS ESTAÇÕES EXTERNA, BOCA E RIO II (JULHO-SETEMBRO/2010)	233
FIGURA 7.83 – CORRELOGRAMAS CRUZADOS DA VARIABILIDADE HÍGRICA (ESTAÇÕES EXTERNA X BOCA E RIO II)	234
FIGURA 7.84 – DENDROGRAMA DE SIMILARIDADES ENTRE AS SÉRIES TRIMESTRAIS DE UMIDADE RELATIVA DO AR	235
FIGURA 7.85 – GRÁFICO COMPARATIVO DOS CORRELOGRAMAS DE UMIDADE RELATIVA DO AR DAS ESTAÇÕES EXTERNA, BOCA E RIO II	236
FIGURA 7.86 – SÉRIES ORIGINAIS DE TEMPERATURA DO AR E DA ÁGUA (JULHO-SETEMBRO/2010)	237
FIGURA 7.87 – CORRELOGRAMAS CRUZADOS DA VARIABILIDADE TÉRMICA ENTRE A ESTAÇÃO EXTERNA E DEMAIS ESTAÇÕES MONITORADAS	238
FIGURA 7.88 – CORRELOGRAMAS CRUZADOS DA VARIABILIDADE TÉRMICA ENTRE A ESTAÇÃO BOCA E DEMAIS ESTAÇÕES MONITORADAS NO INTERIOR DA CAVERNA DE SANTANA	239
FIGURA 7.89 – CORRELOGRAMAS CRUZADOS DA VARIABILIDADE TÉRMICA ENTRE A ESTAÇÃO RIO II E AS ESTAÇÕES RIO III, RIO VERDE E CRISTO	240
FIGURA 7.90 – CORRELOGRAMAS CRUZADOS DA VARIABILIDADE TÉRMICA ENTRE A ESTAÇÃO RIO III E AS ESTAÇÕES RIO VERDE E CRISTO	241
FIGURA 7.91 – CORRELOGRAMA CRUZADO DA VARIABILIDADE TÉRMICA ENTRE AS ESTAÇÕES RIO VERDE E CRISTO	242
FIGURA 7.92 – DENDROGRAMA DE SIMILARIDADES ENTRE AS SÉRIES TRIMESTRAIS DE TEMPERATURA DO AR	245
FIGURA 7.93 – GRÁFICO COMPARATIVO DOS CORRELOGRAMAS DE TEMPERATURA DO AR DE PONTOS NAS TRÊS ZONAS TÉRMICAS OBTIDAS NO DENDROGRAMA DA AHC	246
FIGURA 7.94 – MAPA DOS PRINCIPAIS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO CRUZADA	247
FIGURA 7.95 – MONITORAMENTO MULTI-PARAMÉTRICO (CO ₂ , TEMP., UR E PRESSÃO) NA ESTAÇÃO BACON, ENTRE OS DIAS 17 E 23 DE JANEIRO DE 2010	249
FIGURA 7.96 – MONITORAMENTO MULTI-PARAMÉTRICO (CO ₂ , TEMP., UR E PRESSÃO) NA ESTAÇÃO BACON, ENTRE OS DIAS 24 E 25 DE JANEIRO DE 2010	250
FIGURA 7.97 – MONITORAMENTO DE CO ₂ NA ESTAÇÃO CRISTO, ENTRE OS DIAS 23 DE JANEIRO E 2 DE FEVEREIRO DE 2010	251
FIGURA 7.98 – SÉRIES PARCIAIS DO MONITORAMENTO DE CO ₂ NAS ESTAÇÕES BACON E CRISTO, NOS DIAS 24 E 25 DE JANEIRO DE 2010	251
FIGURA 7.99 – MONITORAMENTO MULTI-PARAMÉTRICO (CO ₂ , TEMP., UR E PRESSÃO) NA ESTAÇÃO BACON, ENTRE OS DIAS 9 E 13 DE FEVEREIRO DE 2010	252
FIGURA 7.100 – MONITORAMENTO MULTI-PARAMÉTRICO (CO ₂ , TEMP., UR E PRESSÃO) NA ESTAÇÃO BACON, ENTRE OS DIAS 20 E 23 DE MARÇO DE 2010	253
FIGURA 7.101 – SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DE SEGUNDA ORDEM DE ISOTERMAS (10 DE ABRIL DE 2010), NO TRECHO TURÍSTICO E ADJACÊNCIAS NA CAVERNA DE SANTANA	255
FIGURA 7.102 – SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DE SEGUNDA ORDEM DE ISOTERMAS (1° DE JANEIRO DE 2011), NO TRECHO TURÍSTICO E ADJACÊNCIAS NA CAVERNA DE SANTANA	256
FIGURA 7.103 – MÁXIMAS, MÉDIAS E MÍNIMAS DO PERFIL TÉRMICO POR TRECHOS DA CAVERNA DE SANTANA	258
FIGURA 7.104 – MÁXIMAS, MÉDIAS E MÍNIMAS DO PERFIL ISOBÁRICO POR TRECHOS DA CAVERNA DE SANTANA	259

FIGURA 7.105 – CARTA DE ISOÁREAS DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA INTERPOLADAS POR TRIANGULAÇÃO, DO DIA 10 DE ABRIL DE 2010, NO TRECHO TURÍSTICO E ADJACÊNCIAS NA CAVERNA DE SANTANA	260
FIGURA 7.106 – DENSIDADE ESPECTRAL DAS SÉRIES DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA DOS DIAS 17 A 23 DE JANEIRO DE 2010 (A) E 9 A 13 DE FEVEREIRO DE 2010 (B)	261
FIGURA 7.107 – PADRÃO DE VARIAÇÃO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA DA SÉRIE DE FEVEREIRO/2010	262
FIGURA 7.108 – CARTA DE ISOÁREAS DE CO ₂ INTERPOLADAS POR TRIANGULAÇÃO, DE 10 DE ABRIL DE 2010, NO TRECHO TURÍSTICO E ADJACÊNCIAS NA CAVERNA DE SANTANA	263
FIGURA 7.109 – CARTA DE ISOÁREAS DE CO ₂ INTERPOLADAS POR TRIANGULAÇÃO, DE 1º DE JANEIRO DE 2011, NO TRECHO TURÍSTICO E ADJACÊNCIAS NA CAVERNA DE SANTANA	264
FIGURA 7.110 – MÁXIMAS, MÉDIAS E MÍNIMAS DO PERFIL DE CO ₂ POR TRECHOS DA CAVERNA DE SANTANA	265
FIGURA 7.111 – DIREÇÃO DOS FLUXOS DE AR AFERIDOS E INFERIDOS NA CAVERNA DE SANTANA	267
FIGURA 7.112 – MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DO AR, ENTRE 6H E 22H, NOS DIAS 18/06/2009 (A) E 4/07/2009 (B)	268
FIGURA 7.113 – MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DO AR, ENTRE AS 6H E AS 22H, NO DIA 22/01/2010	269
FIGURA 7.114 – LOCALIZAÇÃO DAS FEIÇÕES INDICATIVAS DE FLUXO DE AR NA CAVERNA DE SANTANA	271
FIGURA 7.115 – FOTOS DAS FEIÇÕES INDICATIVAS DE FLUXO DE AR NA CAVERNA DE SANTANA	272
FIGURA 7.116 – IMPACTOS (I) E DANOS (II) DA IMPLANTAÇÃO DE INFRA-ESTRUTURA DE ACESSO NA CAVERNA DE SANTANA: A – PASSARELAS DE BLOCOS DE ROCHA E ARGAMASSA; B – PORTÃO DE ENTRADA; C – PASSARELAS DE BLOCOS DE ROCHA E ARGAMASSA, PONTES E CORRIMÃOS EM MADEIRA; D – CORRIMÃO EM MADEIRA E FUNGOS; E – DESOBSTRUÇÃO DE GALERIA, PONTES E CORRIMÃOS DE MADEIRA; F – ESCADAS DE BLOCOS DE ROCHA E ARGAMASSA E INSTRUMENTOS DE AFERIÇÃO DE DADOS AMBIENTAIS.	274
FIGURA 7.117 – IMPACTOS GERADOS PELAS PRÁTICAS DE USO ANTRÓPICO NA CAVERNA DE SANTANA: A – LAMA CARREADA PARA A GALERIA SUPERIOR; B – DESGASTE DA BORDA DE TRAVERTINOS NO CHÃO; C – QUEBRA DE UM PEDAÇO DE TRAVERTINO; D – PIXAÇÕES; E – GRAFISMOS; F – QUEIMADURAS DE CARBURETEIRA; G – FULIGEM DEPOSITADA PELA QUEIMA DO ACETILENO NAS CARBURETEIRAS; PREGOS (H) E MADEIRA (I), RESTOS DE MANUTENÇÃO DAS INFRA-ESTRUTURAS DE ACESSO NO INTERIOR DA CAVERNA.	276
FIGURA 7.118 – DIFERENÇAS ENTRE OS TIPOS DE AMBIENTES SELECIONADOS PARA A COLETA DE AMOSTRAS DE ESPELEOTEMAS: A) AMBIENTE COM FULIGEM PRETA, OLEOSA, QUE SE SOLTA AO TOQUE; B) AMBIENTE SEM FULIGEM, COM ESPELEOTEMAS SEM CONTAMINAÇÃO APARENTE DE CORPOS ESTRANHOS.	277
FIGURA 7.119 – MICROGRAFIAS DE ESPELEOTEMAS. A) SUPERFÍCIE RUGOSA E COM FULIGEM; B) DETALHE DA LATERAL, EVIDENCIANDO A DIFERENÇA ENTRE AS CAMADAS SUPERIORES ESCURAS E INFERIORES BRANCAS; C) SUPERFÍCIE COM FULIGEM EM AUMENTO DE 20X. NOTA-SE A REFLEXÃO DA LUZ EM ALGUMAS FÁCIES DE CRISTAIS DE CALCITA; D) SUPERFÍCIE SEM FULIGEM COM AUMENTO DE 20X. NOTAM-SE OS CRISTAIS COM OS HÁBITOS TÍPICOS DE CALCITA; E) AUMENTO DE 50X NA LATERAL, EVIDENCIANDO UMA CAMADA INTERMEDIÁRIA ENTRE A SUPERFÍCIE SUJA E OS CRISTAIS BRANCO-TRANSLUCENTES; F) AUMENTO DE 20X EM SUPERFÍCIE DE AMOSTRA DE ESPELEOTEMA AVERMELHADO, QUE SE ENCONTRAVA SEM DEPOSIÇÃO APARENTE DE FULIGEM.	279
FIGURA 7.120 – SUPERFÍCIES FISICAMENTE ALTERADAS E MATERIAL PARTICULADO NÃO-IDENTIFICADO EM ESPELEOTEMAS DA AMOSTRA S1. A) SULCOS NA AMOSTRA S1; B) DIFERENÇA ENTRE A SUPERFÍCIE DA AMOSTRA, COM EVIDENTES IMPACTOS FÍSICOS, E SUA LATERAL, QUE NÃO ESTAVA EXPOSTA NA CAVERNA, COM SUPERFÍCIE MAIS PRESERVADA; C) FENDA NATURAL NA AMOSTRA, COM PLACAS CALCÍTIAS, TÚNEIS E MATERIAL PARTICULADO DEPOSITADO E EM AMPLIAÇÃO MAIOR NA FOTO D. NAS ELETROMICROGRAFIAS E E F, MATERIAL PARTICULADO NA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA.	280
FIGURA 7.121 – MATERIAIS PARTICULADOS, BIOFILMES E MATERIAL BIOLÓGICO EM ESPELEOTEMAS. A) SUPERFÍCIE DA AMOSTRA S2, COM DIVERSIDADE DE MATERIAL PARTICULADO. UM FILAMENTO DE TECIDO É IDENTIFICADO NA ELETROMICROGRAFIA B. AS ELETROMICROGRAFIAS C, D E E DEMONSTRAM PROVÁVEIS ORGANISMOS BIÓTIOS IDENTIFICADOS. A ELETROMICROGRAFIA F ILUSTRA UMA ALTERAÇÃO DA SUPERFÍCIE DOS CRISTAIS DE CALCITA.	281
FIGURA 7.122 – ELETROMICROGRAFIAS DE AMOSTRAS SEM APARENTE IMPACTO ANTRÓPICO DIRETO. AS ELETROMICROGRAFIAS A A D SÃO DA AMOSTRA S9, COLETADA EM TRECHO DA CAVERNA FORA DO CIRCUITO DE VISITAÇÃO, ONDE O FLUXO ATMOSFÉRICO NÃO É CUMULATIVO. MESMO NA AMOSTRA S4 (E E F), COLETADA NO SALÃO DO CRISTO, PODE-SE OBSERVAR A EXISTÊNCIA DE CRISTAIS PRESERVADOS EM SUA FACE QUE NÃO ESTAVA EXPOSTA AO AMBIENTE.	283
FIGURA 7.123 – ELETROMICROGRAFIA DA LÂMINA DE VIDRO (B E C) E DE SUA POSTERIOR CONTAMINAÇÃO COM O HUMO DA QUEIMA DO ACETILENO (A).	284

FIGURA 7.124 – ANÁLISE EDS DA AMOSTRA S1BA _____	285
FIGURA 7.125 – ANÁLISE EDS DA AMOSTRA S9A _____	286
FIGURA 7.126 – NÚMERO DE VISITAS/DIA, INCLUINDO OS TURISTAS E OS MONITORES NA CAVERNA DE SANTANA (AGO./2009 – JAN./2010) _____	288
FIGURA 7.127 – VISITAS/DIA X TEMPERATURAS MÁXIMAS NAS ESTAÇÕES CRISTO E ENCONTRO, NO PERÍODO ENTRE 23 DE AGOSTO DE 2009 E 2 DE JANEIRO DE 2010 _____	289
FIGURA 7.128 – CORRELOGRAMAS CRUZADOS ENTRE A VISITAÇÃO DIÁRIA COM A ESTAÇÃO CRISTO (A) E COM A ESTAÇÃO ENCONTRO (B) NO PERÍODO ENTRE SETEMBRO E DEZEMBRO/2009 _____	290
FIGURA 7.129 – VARIAÇÕES HORÁRIAS DE TEMPERATURA DAS ESTAÇÕES CRISTO E ENCONTRO, ENTRE OS DIAS 30 DE OUTUBRO E 3 DE NOVEMBRO DE 2009 EM RELAÇÃO À VISITAÇÃO _____	291
FIGURA 7.130 – CORRELOGRAMAS CRUZADOS ENTRE A VISITAÇÃO DIÁRIA E A ESTAÇÃO CRISTO (A), A ESTAÇÃO ENCONTRO-AR (B) E ROCHA (C) NO PERÍODO ENTRE 30 DE OUTUBRO E 3 DE NOVEMBRO DE 2009 _____	292
FIGURA 7.131 – VISITAS/DIA X TEMPERATURAS MÁXIMAS NA ESTAÇÃO CRISTO, NO PERÍODO ENTRE 1º DE JUNHO E 14 DE SETEMBRO DE 2010. AS BARRAS PRETAS SÃO OS DIAS ÚTEIS E AS AMARELAS OS FINAIS DE SEMANA E FERIADOS. _____	294
FIGURA 7.132 – VISITAS/GRUPO X VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA ESTAÇÃO CRISTO, NO PERÍODO ENTRE 16 E 22 DE AGOSTO (A) E 2 E 8 DE SETEMBRO DE 2010 (B). _____	295
FIGURA 7.133 – CORRELOGRAMAS CRUZADOS ENTRE A VISITAÇÃO DIÁRIA E A ESTAÇÃO CRISTO, NO PERÍODO ENTRE 16 E 22 DE AGOSTO (A) E 2 E 8 DE SETEMBRO DE 2010 (B) _____	296
FIGURA 8.1 – SEÇÃO LONGITUDINAL SIMPLIFICADA DAS CAVERNAS ÁGUA SUJA (A) E SANTANA (B) E SEUS RESPECTIVOS MODELOS PRELIMINARES DE FLUXO DE AR _____	300
FIGURA 8.2 – SÉRIE SELECIONADA ENTRE OS DIAS 02 E 06 DE JUNHO DE 2009, COM DADOS DE NOVE ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO, ILUSTRANDO A AMPLITUDE TÉRMICA (LINHA AMARELA) E A MÍNIMA DE 8,7 °C (TRIÂNGULO AMARELO) NA ESTAÇÃO RIO I. OS CÍRCULOS VERMELHOS EVIDENCIAM QUE O FENÔMENO DE RESFRIAMENTO DO AR NO AMBIENTE EXTERNO – AFERIDO PELA ESTAÇÃO BOCA (CÍRCULO ROXO) –, AFETA OUTRAS ESTAÇÕES MAIS AO FUNDO DA CAVERNA (CÍRCULO VERMELHO) _____	302
FIGURA 8.3 – MEDIDAS DE DISPERSÃO: MÁXIMAS (A) E MÍNIMAS (B), POR ESTAÇÃO DE MONITORAMENTO E CONSIDERANDO OS PERÍODOS FRIO E QUENTE DO ANO _____	306
FIGURA 8.4 – MODELO CONCEITUAL DE CIRCULAÇÃO DE AR EM CORTE LONGITUDINAL PARCIAL DA CAVERNA DE SANTANA, CARACTERIZANDO-A COMO UMA ARMADILHA PARA A CAPTURA DO AR QUENTE (<i>WARM TRAP</i>) _____	308
FIGURA 8.5 – LIMITES APROXIMADOS E VALORES HABITUAIS DE TEMPERATURA DO AR PARA DIVERSOS TRECHOS DA CAVERNA DE SANTANA _____	309
FIGURA 8.6 – AMPLITUDES DIÁRIAS DA TEMPERATURA DA ROCHA NA ESTAÇÃO ENCONTRO E SUA RELAÇÃO COM A VISITAÇÃO _____	313
FIGURA 8.7 – TEMPERATURA DA ROCHA ENTRE OS DIAS 1º DE OUTUBRO E 30 DE NOVEMBRO DE 2009 NA ESTAÇÃO ENCONTRO E SUA RELAÇÃO COM A VISITAÇÃO _____	315
FIGURA 8.8 – SÉRIE DE DETALHE DA TEMPERATURA DA ROCHA ENTRE OS DIAS 20 E 22 DE NOVEMBRO DE 2009 NA ESTAÇÃO ENCONTRO E SUA RELAÇÃO COM A VISITAÇÃO _____	316
FIGURA 8.9 – AMPLITUDES DIÁRIAS DA TEMPERATURA DO AR NAS ESTAÇÕES CRISTO (A) E ENCONTRO (B) NO PRIMEIRO PERÍODO E CRISTO (C) NO SEGUNDO PERÍODO, E SUA RELAÇÃO COM A VISITAÇÃO _____	320
FIGURA 8.10 – COMPARAÇÃO ENTRE AS FORMAS DE REDUÇÃO DO VOLUME DE VISITAÇÃO A PARTIR DOS VALORES CRÍTICOS IDENTIFICADOS, NO MÉTODO DE CÍFUENTES E NA PRESENTE PROPOSTA _____	338
FIGURA 8.11 – ALTERAÇÃO PROPOSTA NO CIRCUITO TRADICIONAL DE VISITAÇÃO DA CAVERNA DE SANTANA, NOS SALÕES DO CAVALO (1) E DO CRISTO (2) _____	342
FIGURA 8.12 – ANÁLISE DO TEMPO TOTAL DE ESTABILIZAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR NOS DIAS DE MAIOR ACRÉSCIMO TÉRMICO – ESTAÇÃO CRISTO _____	346

Lista de Tabelas

TABELA 4.1 – PARQUES NACIONAIS CUJOS PRINCIPAIS ATRATIVOS SÃO O CARSTE E/OU AS CAVERNAS _____	57
TABELA 5.1 – MINERAIS DE CAVERNAS JÁ IDENTIFICADOS NAS CAVERNAS PÉROLAS (SUMIDOURO DO RIO RONCADOR) E DE SANTANA (RESSURGÊNCIA) _____	100
TABELA 6.1 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS INSTRUMENTOS DO PRIMEIRO PRÉ-TESTE _____	112
TABELA 6.2 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS INSTRUMENTOS DO MONITORAMENTO EXPLORATÓRIO _____	113
TABELA 6.3 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS INSTRUMENTOS SUBSTITUÍDOS _____	117
TABELA 6.4 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS INSTRUMENTOS SUBSTITUÍDOS _____	120
TABELA 7.1 – COMPARAÇÃO DAS MEDIDAS DE DISPERSÃO E TENDÊNCIA CENTRAL DA UMIDADE RELATIVA DO AR EXTERNA ENTRE OS MESES DE SETEMBRO DE 2008, 2009 E 2010 _____	146
TABELA 7.2 – COMPARAÇÃO DAS MEDIDAS DE DISPERSÃO E TENDÊNCIA CENTRAL DA TEMPERATURA DO AR EM DOIS PERÍODOS MONITORADOS NA ESTAÇÃO CRISTO _____	177
TABELA 7.3 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS SÉRIES ORIGINAIS DE DADOS DAS ESTAÇÕES SÃO PAULO E DISCOS _____	197
TABELA 7.4 – TOTAL ACUMULADO DE CHUVAS NOS MESES DO INVERNO DE 2010 EM COMPARAÇÃO COM A MÉDIA DO PERÍODO ENTRE 1972-2004 _____	199
TABELA 7.5 – MATRIZ DE PROXIMIDADE (<i>R</i> DE PEARSON) ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS (TEMP. SÉRIE ANUAL) _____	230
TABELA 7.6 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO CRUZADA NO INTERVALO ZERO, DEFASAGENS E RESPECTIVOS ÍNDICES DE CORRELAÇÃO ENTRE A ESTAÇÃO EXTERNA E AS INTERNAS CONSIDERADAS _____	232
TABELA 7.7 – MATRIZ DE PROXIMIDADE (<i>R</i> DE PEARSON) ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS (UR SÉRIE TRIMESTRAL) _____	234
TABELA 7.8 – MATRIZ DE PROXIMIDADE (<i>R</i> DE PEARSON) ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS (TEMPERATURA, SÉRIE TRIMESTRAL) _____	237
TABELA 7.9 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO CRUZADA ENTRE AS SÉRIES DE TEMPERATURA _____	242
TABELA 7.10 – RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS DE AMOSTRAS DE ESPELEOTEMAS _____	287
TABELA 7.11 – MATRIZ DE PROXIMIDADE (<i>R</i> DE PEARSON) ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS NO PERÍODO ENTRE 23 DE AGOSTO DE 2009 E 2 DE JANEIRO DE 2010 _____	289
TABELA 7.12 – MATRIZ DE PROXIMIDADE (<i>R</i> DE PEARSON) ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS NO PERÍODO ENTRE 30 DE OUTUBRO E 3 DE NOVEMBRO DE 2009 _____	291
TABELA 7.13 – MATRIZ DE PROXIMIDADE (<i>R</i> DE PEARSON) ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS NO PERÍODO ENTRE 1° DE JUNHO E 14 DE SETEMBRO DE 2010 _____	293
TABELA 7.14 – MATRIZ DE PROXIMIDADE (<i>R</i> DE PEARSON) ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS NO PERÍODO ENTRE 16 E 22 DE AGOSTO DE 2010 _____	296
TABELA 7.15 – MATRIZ DE PROXIMIDADE (<i>R</i> DE PEARSON) ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS NO PERÍODO ENTRE 2 E 8 DE SETEMBRO DE 2010 _____	296
TABELA 8.1 – MATRIZ DE PROXIMIDADE (<i>R</i> DE PEARSON) ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS _____	303
TABELA 8.2 – MATRIZ DE PROXIMIDADE (<i>R</i> DE PEARSON) ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS _____	304
TABELA 8.3 – MATRIZ DE PROXIMIDADE (<i>R</i> DE PEARSON) ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS _____	305
TABELA 8.4 – MEDIDAS ESTATÍSTICAS DAS SÉRIES ANUAIS DE TEMPERATURA DA ÁGUA (RIO RONCADOR) E DA SUPERFÍCIE DE ROCHA (SALÃO DO ENCONTRO) _____	311
TABELA 8.5 – AMPLITUDES DIÁRIAS (TEMP. DO AR) E PRESENÇA DE VISITANTES NO SALÃO DO CRISTO _____	321
TABELA 8.6 – AMPLITUDES DIÁRIAS (TEMP. DO AR) E PRESENÇA DE VISITANTES NO SALÃO DO ENCONTRO _____	321
TABELA 8.7 – ANÁLISE DO TEMPO TOTAL DE ESTABILIZAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR NOS DIAS DE MAIOR ACRÉSCIMO TÉRMICO – ESTAÇÃO CRISTO _____	345
TABELA 8.8 – ANÁLISE DO TEMPO TOTAL DE ESTABILIZAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR NOS DIAS DE MAIOR ACRÉSCIMO TÉRMICO – ESTAÇÃO ENCONTRO _____	345

Lista de Quadros

QUADRO 4.1 – SÍNTESE DA AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS NA GRUTA DO MAQUINÉ.....	68
QUADRO 4.2 – ZONAS PARA O ZAE	78
QUADRO 6.1 – DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS DE ROCHAS COLETADAS NA CAVERNA DE SANTANA.....	128

Lista de Abreviaturas e Acrônimos

AdI	Área de influência
AHC	Análise de Agrupamentos Hierárquicos
CCC _T	Capacidade de carga espeleoturística ou Capacidade de carga em cavernas turísticas
CCE	Capacidade de carga efetiva
CCF	Capacidade de carga física
CCR	Capacidade de carga real
CCSC	<i>Carrying capacity of show caves</i>
CECAV	Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas
CNC	Cadastro nacional de cavernas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
DOC	Carbono orgânico dissolvido
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
EIA-RIMA	Estudo de Impacto Ambiental – Relatório de Impacto Ambiental
FC	Fator de correção
FF	Fundação Florestal
GGEO	Grupo de Espeleologia da Geologia USP
GPME	Grupo Pierre Martin de Espeleologia
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IGc	Instituto de Geociências – USP
IPHAN-MS	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – Mato Grosso do Sul
LED	<i>Light-emitting diod</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
PA	Pressão atmosférica
PEAR	Parque Estadual do Alto Ribeira
PETAR	Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira
POC	Carbono orgânico particulado
RH	<i>Relative humidity</i>

SBE	Sociedade Brasileira de Espeleologia
SUDELPA	Superintendência de Desenvolvimento do Litoral Paulista
T	Temperatura
TAC	Termo de ajustamento de conduta
UC	Unidade de conservação
UFMS	Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
UR	Umidade relativa do ar
USGS	United States Geological Survey
USDL	United States Department of Labor
USP	Universidade de São Paulo
ZAE	Zoneamento ambiental espeleológico
ZHC	Zona histórico-cultural
ZI	Zona intangível
ZIE	Zona de interferência experimental
ZR	Zona de recuperação
ZUe	Zona de uso extensivo
ZUi	Zona de uso intensivo
ZUr	Zona de uso restrito

Índice

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	2
1.1. <i>Considerações iniciais</i>	2
1.2. <i>Objetivos</i>	5
1.3. <i>Hipóteses</i>	6
1.4. <i>Apresentação dos capítulos</i>	6
2. CARSTE E CAVERNAS.....	9
2.1. <i>Conceitos básicos e o sistema cárstico</i>	9
2.2. <i>Os depósitos químicos secundários</i>	12
2.3. <i>Paisagens cársticas no Brasil</i>	16
3. SISTEMAS ATMOSFÉRICOS SUBTERRÂNEOS.....	20
3.1. <i>Aspectos gerais</i>	20
3.2. <i>Espeleoclima e manejo ambiental</i>	28
3.3. <i>Manejo de cavernas baseado na temperatura ambiente</i>	30
3.4. <i>Parâmetros químicos da atmosfera: manejo ambiental e riscos aos visitantes</i>	32
3.5. <i>Fluxos de energia e matéria e a dispersão de impactos antrópicos</i>	40
3.5.1. <i>Fluxos de ar</i>	40
3.5.2. <i>Fluxos de água</i>	42
3.6. <i>Espeleoclima no Brasil</i>	43
3.6.1. <i>Primeira fase: os perfis exploratórios dos anos 1960 e 1980</i>	44
3.6.2. <i>Segunda fase: os monitoramentos pioneiros dos anos 1990</i>	47
3.6.3. <i>Terceira fase: os estudos e monitoramentos contemporâneos</i>	48
4. ESPELEOTURISMO E MANEJO DE CAVERNAS.....	52
4.1. <i>Conservação ambiental, biodiversidade e geoconservação</i>	52
4.2. <i>Características fundamentais do espeleoturismo</i>	58
4.3. <i>Impactos ambientais do espeleoturismo</i>	60
4.4. <i>Manejo espeleoturístico: princípios e práticas</i>	73
4.4.1. <i>Manejo do espaço subterrâneo</i>	76
4.4.1.1. <i>Zoneamento ambiental espeleológico</i>	76
4.4.1.2. <i>Delimitação do caminhamento de visitação</i>	79
4.5. <i>Capacidade de carga turística</i>	80
4.5.1. <i>O coeficiente de rotatividade</i>	83
4.5.2. <i>O controle dos parâmetros ambientais</i>	84
4.5.3. <i>A capacidade de carga de Cifuentes</i>	86

4.5.4. Projeção de cenários e mapas temáticos de fragilidade do ambiente	87
5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA	90
5.1. Localização	90
5.2. Geologia regional	92
5.3. Sistema cárstico Pérolas-Santana	94
5.4. Clima regional	100
5.5. Histórico da exploração, visitação e o turismo na caverna de Santana	103
6. MATERIAIS, MÉTODOS E ETAPAS DA PESQUISA	111
6.1. Variáveis pesquisadas	111
6.2. Procedimentos de registro e coleta	112
6.2.1. Monitoramento espeleoclimático	112
6.2.1.1. Testes preliminares de monitoramento	112
6.2.1.2. Monitoramento contínuo	113
6.2.1.2.1. Monitoramento anual exploratório	113
6.2.1.2.2. Monitoramento trimestral em escala de detalhe	120
6.2.1.3. Perfis atmosféricos	123
6.2.2. Circulação atmosférica e concentração gasosa	125
6.2.3. Pluviosidade	125
6.2.4. Fotomonitoramento	126
6.2.5. Amostras de rochas e depósitos químicos secundários	126
6.3. Tratamento dos dados coletados	129
6.4. Análise dos dados	129
6.4.1. Análise dos dados atmosféricos por estação de monitoramento	129
6.4.2. Análise estatística da dinâmica atmosférica subterrânea	132
6.4.3. Estatística geoespacializada no perfil atmosférico espaço-temporal	134
6.4.4. Análise das amostras de espeleotemas	135
6.5. Interpretação dos dados	136
7. RESULTADOS	138
7.1. Apresentação	138
7.2. Monitoramento Anual	140
7.2.1. Monitoramento da zona externa	140
7.2.1.1. Chuvas	143
7.2.1.2. Temperatura e umidade relativa do ar da estação Externa	146
7.2.2. Monitoramento da zona transicional	150
7.2.2.1. Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Boca	152

7.2.1.2.	<i>Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Rio I.....</i>	155
7.2.3.	<i>Monitoramento da zona interna típica</i>	159
7.2.3.1.	<i>Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Rio II.....</i>	161
7.2.3.2.	<i>Variação da temperatura do ar, da água e umidade relativa do ar na estação Rio III</i>	164
7.2.3.2.1.	<i>Temperatura e umidade relativa do ar.....</i>	165
7.2.3.2.2.	<i>Temperatura da água.....</i>	167
7.2.4.	<i>Monitoramento da zona de baixa amplitude térmica.....</i>	169
7.2.4.1.	<i>Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Fafá.....</i>	172
7.2.4.2.	<i>Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Cristo</i>	174
7.2.4.3.	<i>Variação da temperatura do ar, da rocha e umidade relativa do ar na estação Encontro</i>	179
7.2.4.3.1.	<i>Temperatura e umidade relativa do ar.....</i>	180
7.2.4.3.2.	<i>Temperatura da superfície de rocha.....</i>	183
7.2.4.4.	<i>Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Escada.....</i>	187
7.2.5.	<i>Monitoramento da zona de temperatura estável.....</i>	189
7.2.5.1.	<i>Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Discos</i>	191
7.2.5.2.	<i>Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação São Paulo..</i>	195
7.3.	<i>Monitoramento trimestral em escala de detalhe no inverno de 2010.....</i>	197
7.3.1.	<i>Monitoramento da zona externa.....</i>	198
7.3.1.1.	<i>Chuvas.....</i>	198
7.3.1.2.	<i>Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Externa.....</i>	200
7.3.2.	<i>Monitoramento da zona transicional</i>	204
7.3.2.1.	<i>Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Boca</i>	204
7.3.3.	<i>Monitoramento da zona interna típica</i>	209
7.3.3.1.	<i>Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Rio II.....</i>	209
7.3.3.2.	<i>Variação da temperatura do ar, da água e da umidade relativa do ar na estação Rio III</i>	213
7.3.3.2.1.	<i>Temperatura e umidade relativa do ar.....</i>	214
7.3.3.2.2.	<i>Temperatura da água.....</i>	216
7.3.4.	<i>Monitoramento da zona de baixa amplitude térmica.....</i>	218
7.3.4.1.	<i>Variação da temperatura e da umidade relativa do ar na estação Rio Verde ..</i>	218
7.3.4.2.	<i>Variação da temperatura e da umidade relativa do ar na estação Cristo</i>	221
7.4.	<i>Perfis espeleoclimáticos da caverna de Santana.....</i>	226
7.4.1.	<i>Perfil espeleoclimático temporal da série anual.....</i>	226

7.4.2. Perfil espeleoclimático temporal da série trimestral de detalhe.....	233
7.5. Monitoramento das Concentrações de Gás Carbônico.....	248
7.6. Perfil espaço-temporal multivariado.....	254
7.7. Fluxos de ar e condensação de água na caverna de Santana.....	266
7.8. Impactos ambientais do turismo.....	273
7.8.1. Impactos e danos nas rochas e espeleotemas.....	274
7.8.2. Impactos no espeleoclima.....	287
8. DISCUSSÃO.....	298
8.1. Apresentação.....	298
8.2. Dinâmica atmosférica subterrânea.....	298
8.3. Impactos ambientais da presença humana no meio físico em cavernas.....	312
8.3.1. Impactos nas rochas e espeleotemas.....	312
8.3.2. Impactos na atmosfera subterrânea.....	318
8.4. Manejo do espeleoturismo com base em parâmetros determinantes do ambiente.....	324
8.5. Capacidade de carga espeleoturística.....	328
8.5.1. Delimitação preliminar do caminhamento e análise do fluxo de visitação.....	329
8.5.2. Projeção do cenário de visitação desejado.....	331
8.5.3. Análise de parâmetros ambientais para a identificação de fatores críticos sazonais.....	333
8.5.4. Transformação do fator crítico em índice de limitação.....	335
8.5.5. Obtenção da capacidade de carga de cavernas turísticas (CCC_T).....	339
8.5.6. Monitoramento dos fatores críticos considerados.....	340
8.6. Funcionalidade e aplicação do método proposto.....	340
8.6.1. Validação do resultado obtido e consolidação da capacidade de carga espeleoturística.....	349
CAPÍTULO 9 – CONCLUSÕES.....	351
REFERÊNCIAS.....	358
APÊNDICES.....	388
ANEXO.....	392



Capítulo 1
INTRODUÇÃO

Um dos desafios do manejo espeleológico:
proporcionar o acesso às delicadas belezas subterrâneas sem destruí-las.
Flores de Aragonita no salão das Flores, caverna de Santana.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A relação existente entre os seres humanos e as cavernas remete a milhares de anos, quando estas eram os abrigos mais adequados que existiam na superfície da Terra. Com o passar do tempo, a espécie humana foi identificando e criando novas necessidades para a obtenção de seu bem-estar, tendo sempre os recursos naturais como fonte para o seu desenvolvimento. A tônica dessa suposta evolução se deu com a supressão de recursos e a modificação das paisagens naturais.

Desde as civilizações mais antigas, as cavernas são fonte de fascínio e repulsa, servindo de base para mitos e metáforas da evolução humana. Na *Alegoria da Caverna*, do livro VII d' *A República* do filósofo Platão, o ser humano, a princípio aprisionado em uma caverna e com visão parcial do mundo externo por uma pequena fresta, somente se liberta de sua condição primitiva ao evoluir por meio do conhecimento filosófico e da educação, ao sair da caverna.

Posteriormente, no Século XVIII, ocorreu a revalorização da natureza, com a busca por paisagens menos modificadas, para fins terapêuticos e visando à renovação psíquica e espiritual (THOMAS, 2001; REJOWSKI et al., 2005). Não tardou para que as cavernas voltassem a ser procuradas pelos seres humanos, por

motivos religiosos e culturais (TRAVASSOS, 2010), para fins de estudo e, a partir do Século XX, para as práticas recreativas.

Se por um lado, a relação entre os seres humanos e as cavernas nos últimos milênios passou por diversas alterações, por outro lado, a dinâmica deste ambiente se processa em escalas temporais mais amplas, que remetem a milhares de anos. Durante todo este tempo, e até algumas décadas atrás, a maioria das mais expressivas cavernas do mundo, que abrigam formas de acentuado valor paisagístico, vestígios arqueológicos e a vida subterrânea, esteve protegida, sujeita apenas à própria dinâmica de desconstrução e reconstrução da paisagem.

Na contemporaneidade, o espeleoturismo se intensificou, no Brasil e no mundo, sujeitando as cavernas a um nível desconhecido de pressão, em função dos aportes de energia e massa gerados pela presença humana. Em algumas cavernas do mundo, o acumulado anual varia entre 500.000 e 1.800.000 visitas, em países como Áustria, Bélgica, China, Geórgia, Índia, Eslovênia e Espanha (CIGNA; BURRI, 2000). No Brasil, esta grandeza é bastante inferior, na casa das 30.000 a 50.000 visitas anuais, em cavernas como a do Maquiné, em Cordisburgo-MG, do Diabo, em Eldorado-SP e do Lago Azul, em Bonito-MS (LOBO et al., 2010a).

Os primeiros trabalhos de manejo de cavernas com base em parâmetros ambientais no Brasil foram realizados em Bonito, Mato Grosso do Sul, para as grutas do Lago Azul, de Nossa Senhora Aparecida, de São Miguel e o abismo Anhumas, entre a última década do século passado e a primeira do século atual (LOBO, 2006a). Especial destaque para os estudos de impactos ambientais realizados em 1999 no Monumento Natural gruta do Lago Azul, que englobaram a caverna homônima e a gruta de Nossa Senhora Aparecida. Trata-se da primeira iniciativa de identificação dos limites diários de uso do ambiente por meio da capacidade de carga em território nacional (SILVA, 2003; BOGGIANI et al, 2007). Na ocasião, foi empregado o método de capacidade de carga em trilhas de Miguel Cifuentes (CIFUENTES-ARIAS, 1992) em caminhamentos de visitação pré-estabelecidos.

Paralelamente, nos anos de 1990 foram desenvolvidas metodologias de capacidade de carga para cavernas com alto grau de fragilidade na Espanha e em outros países, que abrigam pinturas rupestres, minerais instáveis ou espeleotemas raros. Os trabalhos mais representativos foram feitos por: Hoyos et al. (1998), Sánchez-Moral et al. (1999), Calaforra et al. (2003) e Fernández-Cortés et al.

(2006a). Estes autores utilizaram parâmetros atmosféricos para a determinação da capacidade de carga do ambiente. A ideia geral é encontrar um limite de uso cujos impactos consequentes não excedam as variações naturais do ambiente. Esta concepção resulta em volumes de visitação muito baixos, muitas vezes inviabilizando o espeleoturismo.

Estas duas formas de obter a capacidade de carga se basearam em linhas de problematização diferentes, para chegar a um resultado semelhante. Se em Cifuentes-Arias (1992), a visitação é inicialmente encarada como uma questão de disponibilidade e limitação espacial, em Hoyos et al. (1998) e outros na mesma linha, os limites para a visitação são dados em função da premissa de nenhuma alteração da atmosfera cavernícola. Embora ambos obtenham respostas adequadas aos princípios que adotam, entende-se que tais premissas não são as mais adequadas para a maioria das cavernas – aquelas que não possuem um fator limitante ambiental de extrema fragilidade. Desta forma, a presente pesquisa partiu de um questionamento simples, mas que ainda não obteve uma resposta definitiva para o manejo turístico de cavernas: como obter um limite diário de visitação em ambientes subterrâneos confinados em função de sua dinâmica atmosférica?

Para investigar esta questão, as fragilidades do ambiente continuaram em voga, mas sob outra perspectiva. A presente pesquisa considerou que os impactos do espeleoturismo são inerentes e indissociáveis de suas práticas (CIGNA; FORTI, 1988; CIGNA, 1993; GILLIESON, 1996). Além disso, partiu do pressuposto que o ambiente tolera certos níveis de alteração, considerando seu equilíbrio dinâmico e a sua fragilidade, compreendida como o grau relativo de perturbação, sem alteração definitiva de sua dinâmica natural (WATSON; LOVELOCK, 1983; CIGNA, 1993; ROSS, 1994; MANGIN et al., 1999).

Partindo desta compreensão do tema, foi feito um estudo de monitoramento e perfilagem atmosférica da caverna de Santana, em um intervalo temporal de dois anos, de forma a permitir a compreensão de suas variações naturais e das interferências do uso turístico. De forma complementar, foram feitas análises em amostras de espeleotemas da caverna, visando encontrar parâmetros mais evidentes tanto da dinâmica do ambiente quanto dos impactos da visitação. O presente estudo possui seus limites devidamente definidos, pois enfoca apenas parte dos parâmetros físicos que devem ser observados no manejo espeleológico, sem levar em conta aspectos ligados à biota subterrânea.

Para investigar o problema, foram estabelecidos protocolos de monitoramento atmosférico e de coleta de rochas, bem como de análises estatísticas e gráficas, com base nos trabalhos de Pulido-Bosch et al. (1997), Hoyos et al. (1998), Sánchez-Moral et al. (1999), Cigna (2002a, b) e Fernández-Cortés et al. (2006a, b, c).

A escolha da caverna de Santana como local da pesquisa se deu por fatores de ordem prática e outros relacionados ao tema pesquisado. Do ponto de vista prático, foram considerados a facilidade de acesso ao local e o histórico de pesquisa já desenvolvido na caverna, tanto pelo autor desta pesquisa (LOBO, 2004, 2005, 2008a, b; LOBO; ZAGO, 2007) quanto por outros pesquisadores (BARBIERI, 1993; KARMANN, 1994; VIANA JR., 2002; SCALEANTE, 2003; CRUZ JR., 2005, entre outros). Sobre o tema pesquisado, a existência de grande volume de visitação na caverna, aliada a sua complexidade ambiental – composta por diversos níveis de galerias e distintos padrões de movimentação de energia e massa –, foram fatores decisivos para sua seleção.

Além do auxílio pontual para o manejo da caverna de Santana, o presente estudo buscou contribuir com o conhecimento sobre o manejo da visitação com base em determinantes ambientais, por meio da ampliação dos estudos espeleoclimáticos no Brasil e da obtenção de um método de capacidade de carga para cavernas ou trechos delas que não apresentem aspectos dominantes de fragilidade ambiental.

1.2. Objetivos

A presente pesquisa foi norteada pelos seguintes objetivos:

Objetivo geral:

- Estabelecer parâmetros científicos para os limites de capacidade de carga espeleoturística em função da dinâmica atmosférica de uma caverna.

Objetivos específicos:

- Identificar possíveis impactos ambientais negativos causados pela presença humana no meio físico
- Identificar subsídios para a indicação dos limites aceitáveis de alteração das variáveis espeleoclimáticas em função da visitação turística
- Identificar, testar e validar indicadores ambientais espeleológicos aplicáveis ao manejo espeleoturístico.

1.3. Hipóteses

Os objetivos secundários elencados se constituíram em etapas para a realização da pesquisa, visando, em um primeiro momento, facilitar a consecução do objetivo geral e, principalmente, permitir a comprovação das hipóteses de trabalho, levantadas a partir de estudos já publicados:

1. A presença humana nas cavernas causa alterações ambientais, ainda que em escalas mínimas de detalhe (PULIDO-BOSCH et al., 1997; MANGIN et al., 1999; FERNANDEZ-CORTÉS et al., 2006a).
2. O espeleoclima e sua dinâmica fornecem os subsídios mínimos para a capacidade de carga espeleoturística (CIGNA; FORTI, 1988; CIGNA, 2009).
3. A análise da superfície de rochas fornece indicadores de impactos antrópicos nas cavernas (PULIDO-BOSCH et al., 1997; SÁNCHEZ-MORAL et al., 1999).

Estas serviram como etapas para a investigação da hipótese principal:

- A identificação de limites de variação espeleoclimática que não alterem em definitivo a dinâmica atmosférica subterrânea, considerando a sua capacidade de resiliência e o retorno ao seu estado estacionário após a geração de um impacto antrópico, são fatores determinantes para a capacidade de carga espeleoturística.

1.4. Apresentação dos capítulos

A pesquisa desenvolvida passou por fases de compilação teórica e atividades de coleta primária de dados em campo. A presente tese é ordenada por capítulos, divididos por temas para a melhor compreensão do raciocínio desenvolvido. Os resultados das pesquisas teóricas em dados secundários também são apresentados, dado que permitem delimitar, sobretudo quanto ao manejo, as linhas de raciocínio adotadas para o desenvolvimento da discussão e obtenção de um novo método de capacidade de carga.

No Capítulo 2 é feita uma breve introdução sobre o meio físico das cavernas. Esta inclui uma caracterização geral do carste, dos processos espeleogenéticos e da deposição química secundária, considerando a ótica geoconservacionista deste estudo. Por fim, as principais áreas cársticas do Brasil também são apresentadas.

No Capítulo 3 o enfoque se volta para a atmosfera subterrânea, com ênfase na circulação atmosférica e nos atributos espeleoclimáticos. A relação dos

parâmetros atmosféricos com a presença humana é descrita, a partir dos principais estudos de manejo de cavernas em escala mundial. O capítulo se encerra com um histórico da pesquisa sobre espeleoclima no Brasil.

Fechando o escopo teórico da pesquisa, o Capítulo 4 descreve as principais tendências de manejo de cavernas no Brasil e no mundo. A abordagem se inicia com aspectos teóricos da geoconservação, destacando o papel do espeleoturismo como forma sustentável de uso do patrimônio espeleológico. Os impactos do espeleoturismo são detalhados, em função de sua implantação e das práticas de uso adotadas. Acerca do manejo espeleológico, as principais correntes vigentes no Brasil são descritas em sua perspectiva técnica atual.

O Capítulo 5 descreve a área da pesquisa, partindo de uma contextualização regional do carste e enfocando na caverna de Santana. A revisão inclui aspectos do meio físico e destaca a importância da caverna de Santana para o turismo na região.

O Capítulo 6 descreve a metodologia da pesquisa, incluindo as fases de coleta, tratamento e análise dos dados e uma descrição dos instrumentos de coleta e registro utilizados. Os procedimentos de análise estatística são expostos de forma a demonstrar a sua validade na aplicação de estudos desta ordem.

Os resultados da pesquisa são compilados no Capítulo 7. A organização dos dados considerou um ordenamento espacial, se iniciando no lado externo e se dirigindo para as estações de monitoramento em zonas profundas da caverna de Santana. Na continuidade, foram detalhados os resultados do monitoramento de gás carbônico (CO₂), dos fluxos de ar, dos perfis multivariados (CO₂, temperatura e umidade relativa do ar e pressão atmosférica) e das análises de amostras de espeleotemas. O capítulo se encerra com o registro de impactos da visitação.

O Capítulo 8 é reservado às discussões. A princípio, foram analisados os padrões de circulação atmosférica na caverna de Santana. Posteriormente, foram analisados mais a fundo os impactos da visitação, em busca da identificação dos processos de estabilização dos parâmetros afetados. Por fim, é apresentada a metodologia de capacidade de carga espeleoturística proposta nesta tese, em conjunto com o primeiro teste de sua aplicabilidade.

As conclusões são apresentadas no Capítulo 9. Os aspectos abordados dizem respeito aos impactos ambientais do espeleoturismo e à metodologia de capacidade de carga espeleoturística desenvolvida. As conclusões enfatizam os aspectos positivos, limitações observadas e as perspectivas para estudos futuros.



Capítulo 2
CARSTE E
CAVERNAS

Cone, forma típica e clássica
do relevo cárstico, encoberto
pela exuberante Floresta Atlântica.
PETAR, Iporanga-SP.

2. CARSTE E CAVERNAS

2.1. Conceitos básicos e o sistema cárstico

As cavernas são formas de relevo de sub-superfície, desenvolvidas pela dissolução de rochas solúveis. Grande parte delas ocorre em uma paisagem bastante peculiar, o carste. Além das cavernas, possui outros elementos típicos da paisagem, como dolinas, somidouros e ressurgências, que também podem gerar atratividade turística. Algumas regiões cársticas são destacadas pela ausência ou escassez de drenagens superficiais, com águas geralmente límpidas e intensa formação de depósitos carbonáticos (tufas) na forma de cachoeiras e barragens naturais, como as da Serra da Bodoquena (Mato Grosso do Sul) e do Parque Plitvice (Croácia).

A palavra *Karst* é uma adaptação germânica dos termos regionais *Kras* da Eslovênia ou *Carso* da Itália (GAMS, 1993), a qual prevaleceu sobre as demais durante o império Austro-Húngaro (FORD; WILLIAMS, 2007). Sua provável origem deriva do vocábulo pré-Indo-Europeu *Karra*, cujo significado é rocha (HROMNÍC, 2001). Sua admissão e propagação enquanto termo técnico e científico se deu no final do Século XVIII e início do Século 19, por influência das escolas de geografia e geologia de Viena, na Áustria. No Brasil, o termo popularizou-se em sua forma aportuguesada: carste.

O termo carste recebe diversas definições, a começar pelas traduções literais, como “campo de pedras calcárias” (LINO, 2001, p. 52) e “uma paisagem desolada, sem água” (ENVIRONMENTAL POLLUTION AGENCY, 2002). Ambas fazem menção a algumas das características evidentes do relevo exocárstico, sem, no entanto, adentrar em aspectos processuais. Uma especificação mais funcional, baseada na visão sistêmica de elementos e processos, é dada por Ford (2004):

Um terreno com hidrologia distinta e formas de relevo resultantes da combinação entre rochas de alta solubilidade e porosidade de condutos secundários de dissolução bem desenvolvidos. A dissolução aquosa é o processo chave, pois inicia a gênese dos condutos secundários e é possivelmente a maior ou a principal responsável pelos relevos de superfície. Quando este não é o processo quantitativamente predominante, age como um gatilho essencial que permite a outros agir, como por exemplo, a formação de uma dolina por colapso mecânico de uma camada insolúvel com uma cavidade de dissolução abaixo (2004, p. 1017).

O conceito apresentado não se limita às litologias carbonáticas, pois menciona apenas suas características e componentes. Estudos recentes (e.g. WRAY, 1997, 2003; SELF; MULLAN, 2005) têm incluído outras litologias, como arenitos e quartzitos, na definição de carste. No entanto, o planalto de *Kras*, na Eslovênia, que serviu de base para a criação do termo, é um clássico carste caracterizado por calcários e dolomitos do Cretáceo Inferior ao Eoceno (KRANJC, 2004). Esta região corresponde a uma faixa no sentido Noroeste-Sudeste em relação aos montes Dináricos, com aproximadamente 40 km de extensão e 13 km de largura, com uma área de 550 km² (KRANJC, 2004). Seus aspectos geológicos e hidrológicos são investigados desde o Século XVI, o que faz desta uma das áreas cársticas mais estudadas do mundo (CUCCHI et al., 2000).

Uma das principais características das regiões cársticas é o predomínio da drenagem subterrânea. No planalto de *Kras*, embora a média anual de precipitação varie entre 1400-1650 mm, não se encontram rios em superfície (KRANJC, 2004).

A maioria das formas do relevo cárstico, entre elas as cavernas, são decorrentes de processos que possuem relação de dependência com a água que passa pelo ambiente. A maior parte dos relevos cársticos é formada por dissolução gerada pela água meteórica, precipitada na forma de chuva ou neve, muito embora outros processos sejam relatados, como a ação de águas de intrusão marinha e fluidos liberados na consolidação de rochas magmáticas (FORD, 2004; WILLIAMS, 2004). Trata-se, portanto, de uma paisagem dinâmica, em constante progresso e

evolução (WHITE, 2007). A diversidade morfológica do carste pode ser vista nas formas de relevo exibidas na Figura 2.1.



Figura 2.1 – Exemplos brasileiros de formas exocársticas: a) *Polje* do Sumidouro, depressão suave que forma a lagoa do Sumidouro, em Lagoa Santa-MG; b) Relevo exumado, formado por torres ruiformes em planície cárstica em Buritinópolis-GO; c) Tufas calcárias ativas, na ressurgência da gruta do Urubu-Rei, em Bodoquena-MS; d) Sumidouro do João Baio, no sistema cárstico João Rodrigues, São Desidério-BA; e) Dolina formada pelo colapso, conhecida como buraco das Araras, em Formosa-GO; f) *Microkarren*, pequenos lapiaz de dissolução, em Buritinópolis-GO

A gênese da maioria das cavernas está ligada à dissolução das rochas carbonáticas. Exceções clássicas de formação de cavidades em rochas não-

carbonáticas são os tubos de lava, os geodos gigantes, as paleotocas de tatus gigantes, as cavernas em gelo e aquelas formadas por abrasão física ou *piping* de rochas areníticas ou solos arenosos. Além disso, Wortington (2003) acrescenta também que o resultado da espeleogênese é morfologicamente diversificado, em função das relações entre a matriz rochosa, a porosidade secundária, os planos de acamamento e a origem e a química da água.

2.2. Os depósitos químicos secundários

Os espeleotemas são deposições minerais secundárias originadas por processos químicos de dissolução e precipitação, gerados por águas autogênicas, hipogênicas ou halogênicas (HILL; FORTI, 1995; FORTI, 2001). Eles se diferenciam da matriz rochosa, dos veios e intrusões minerais na rocha e da matéria orgânica, muito embora estes elementos primários sejam fundamentais para a sua formação (SELF; HILL, 2003). As algas e plantas que habitam as zonas fóticas de uma caverna orientam os espeleotemas em direção à luz, influenciando em sua formação (KASHIMA et al., 1987; FORTI, 2001), assim como as raízes de plantas, as fezes de animais (FORTI, 2001) e as bactérias (ERCOLE et al., 2001).

Outro agente responsável pela gênese e crescimento de espeleotemas é o intemperismo subterrâneo em ambiente vadoso (Figura 2.2). Sua participação é importante principalmente quando: a) o gradiente térmico é elevado; e b) a água de condensação é relativamente mais agressiva e/ou abundante, em consequência saturação hídrica do ar (CIGNA; FORTI, 1986; PALMER, 2007).

Iluminação	LUZ DIRETA	LUZ DIFUSA	PENUMBRA	SEM LUZ
Temperatura do Ar	VARIAÇÕES DIOTURNAS		PEQUENAS VARIAÇÕES	MÍNIMAS VARIAÇÕES
Umidade Relativa do Ar	GRANDE AMPLITUDE (50-99%)		MÉDIA AMPLITUDE, ALTA (80-99%)	ESTÁVEL, ALTA (>95%)
Perfil Hipotético da Caverna/Zona				
Provável Morfologia das Estalactites				
Petrologia	POROSO, DESORDENADO, HETEROGÊNEO		DURO, DENSO, ORGANIZADO	
Dimensão dos Cristais	MICROCRISTAIS		MACROCRISTAIS	
Processos Genéticos	DOMÍNIO DE PROCESSOS BIOGÊNICOS		INFLUÊNCIA DE PROCESSOS BIOGÊNICOS	PRECIPITAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA
Tipo de Rocha	TUFA		TRANSICIONAL	ESPELEOTEMAS

Figura 2.2 – Modelo conceitual ilustrando a relação entre espeleotemas e diversos fatores, dos quais o gradiente espeleoclimático é substancial para a sua alteração: tufas mais próximas às entradas e estalactites nas zonas mais profundas. O esquema ilustra a diversidade de morfologias, não a progressão de sua gênese (TABOROSI et al., 2005)

Os espeleotemas podem ser definidos como os modos de ocorrência ou a forma de um depósito mineral secundário em caverna (HILL; FORTI, 1995, 1997). Por sua vez, o mineral de caverna é um sólido homogêneo com uma composição química definida e um arranjo atômico tridimensional ordenado (SELF; HILL, 2003), que cresce naturalmente como um depósito secundário, ou seja, derivado de um mineral primário por meio de uma reação química (FORTI, 2009a). Mais de 250 minerais de caverna já eram descritos até o trabalho de Hill; Forti (1995), chegando próximo aos 300 na atualidade (FORTI, 2009a). Destes, apenas três podem ser considerados comuns: calcita, aragonita e gipsita. A deposição de um espeleotema em aragonita se diferencia da calcita por meio de impurezas de Sr^{2+} , levando a um processo de supersaturação da aragonita e sua posterior deposição. Por sua vez, a gipsita tem sua origem na precipitação do Sulfato de Cálcio ($CaSO_4$), podendo se originar na dissolução do gesso ou por oxidação da Pirita (S_2Fe), entre outras origens menos comuns (WHITE, 2009).

Em sua maioria, os espeleotemas são brancos, pela predominância do íon Ca^{2+} nas formações. Todavia, sua cor pode variar, entre tons de vermelho, marrom, azul, verde e preto, o que ocorre em função de diversos fatores, como a presença de elementos traço na percolação, ácidos orgânicos ou mesmo a espessura das

camadas depositadas (VERHEYDEN, 2005). Além das causas naturais para variação da coloração, também podem ocorrer alterações por influência antropogênica. Chang et al. (2008) identificaram deposições pretas em espeleotemas de cavernas sul-coreanas, originadas pela presença humana.

A classificação dos espeleotemas, tradicionalmente, é feita por meio de dois caminhos distintos: a) pela sua morfologia; b) por sua origem. Ambos apresentam problemas clássicos. Quanto à morfologia, o problema é que espeleotemas distintos, muitas vezes compostos por minerais pertencentes a classes totalmente diferenciadas, são inseridos em um único grupo. Como exemplo, as estalactites, os canudos e as espatites podem gerar confusão, por serem formas semelhantes, mas com origens e composições minerais muitas vezes distintas (HILL; FORTI, 1995).

Quanto à origem, sua dificuldade de classificação ocorre porque em um mesmo espeleotema, podem ser envolvidos diversos processos de formação. A estalactite pode ser mais uma vez usada como exemplo: seu crescimento vertical ocorre pela precipitação de mineral em função do gotejamento – as águas circulantes. Por outro lado, seu espessamento horizontal ocorre por fluxo de capilaridade – as águas de exsudação. Além disso, existe uma grande parte dos espeleotemas em que não se conhece o processo exato de sua origem, o que leva à classificação imprecisa e sem propósito (HILL; FORTI, 1995). No Brasil, esta é uma das formas mais utilizadas de classificação de espeleotemas, a partir de um trabalho de Guimarães (1966), o qual é bastante difundido, por exemplo, em livros didáticos como Domingos; Santos (2000) e na literatura de divulgação espeleológica, como no trabalho de Lino (2001).

Na atualidade, a classificação mais bem aceita por mineralogistas que estudam os minerais de cavernas e espeleotemas é a sua ontogenia, o estudo de cristais individuais e seus agregados como corpos físicos, e não como espécie mineral. Trata-se de um sistema que pode ser usado para explicar tanto o crescimento e desenvolvimento quanto o motivo de existirem diferentes tipos de espeleotemas (SELF; HILL, 2003; SELF, 2004; WHITE, 2009). A Figura 2.4 apresenta alguns exemplos de espeleotemas, já classificados conforme a sua ontogenia.



Figura 2.3 – Alguns espeleotemas em cavernas brasileiras: a) cristal individual de segunda ordem, tipo esqueleto, em ponta de estalactite na caverna de Santana, em Iporanga-SP; b) cristal agregado de primeira ordem, tipo coralito, na caverna Azuias, em Iporanga-SP; c) cristal agregado de primeira ordem, tipo coralito, em forma de bolha, na gruta dos Túneis, em Lagoa Santa-MG; d) cristas agregadas de primeira ordem, tipo agregados interativos, as helictites no salão Erectus, na caverna do Diabo, em Eldorado-SP; e) *koras*, ou agregados, as colunas na gruta do Urubú-Rei, em Bodoquena-MS; e f) combinação entre associação de *koras*, em conjunto com estalactite, escorrimentos e flores, no salão das Flores, em Iporanga-SP

Os espeleotemas também têm sido usados com importante fonte de informações pretéritas, sobre o ambiente e o clima. Davis (1999) estudou o pólen e outros microfósseis pleistocênicos na caverna Kartchner, EUA, contribuindo para a

reconstrução paleoambiental local. Fairchild; McMillan (2007) focaram nos espeleotemas como indicadores de períodos de chuvas e estiagem, linha também seguida no Brasil por Cruz Jr. (2003) e Cruz Jr. et al. (2005), com análises que remontam a 116.000 anos, baseadas em dados da caverna de Santana, no estado de São Paulo, e da gruta de Botuverá, em Santa Catarina.

Além do clima pretérito, o espeleoclima atual também pode interferir no crescimento e na morfologia dos espeleotemas. Em alguns casos, os espeleotemas podem ser usados para inferir padrões de circulação atmosférica. Alguns tipos de coralóides são formados a partir da deposição e evaporação de filmes d'água sobre a rocha. Na presença de uma circulação atmosférica constante ou cíclica, a face de um corpo rochoso em contato direto com o fluxo de ar permite aumentar a evaporação da água, com a liberação do CO₂ e a deposição de minerais (QUEEN, 1981; PALMER, 2007; SELF, 2009). Buecher (1999) apresentou um estudo conclusivo dos fluxos de ar na caverna Karchner, EUA, com base na posição das pipocas – um tipo de coralóide – nas paredes. Em outro exemplo, Carreño; Urbani (2004) descrevem estalactites inclinadas na zona afótica de uma caverna venezuelana, direcionadas pelo vento; de igual modo, De Waele et al. (2009) apresentam a forma de crescimento de um macrocristal agregado de primeira ordem, de halita (NaCl), em cavernas no deserto do Atacama, Chile, com participação fundamental dos fluxos de ar na inclinação do eixo de crescimento vertical dos cristais sobrepostos. Queen (2009) desenvolveu um estudo sobre a espeleogênese de algumas cavernas das montanhas de Guadalupe, EUA, tecendo conclusões com base na posição e altura das pipocas nas paredes das cavernas.

Por fim, um estudo pioneiro feito por Prelovsek (2009) relaciona as variações sazonais das concentrações de CO₂ da atmosfera cavernícola com as taxas de deposição de minerais nos espeleotemas, ampliando fronteiras para estudos futuros sobre o tema.

2.3. Paisagens cársticas no Brasil

As rochas carbonáticas são bastante abundantes no Brasil. A área de ocorrência de carbonatos aflorantes no país varia entre 2,2% (AULER, 2002) a 2,8% (KARMANN; SALLUN FILHO, 2007 – Figura 2.5), dependendo da escala de mapeamento. Estas rochas se distribuem em sua maioria nos estados de Minas Gerais, Bahia e Goiás, e em menores proporções em São Paulo, Paraná, Tocantins,

Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e em outros estados da região Nordeste e Sul. Em termos de desenvolvimento de condutos mapeados, os estados da Bahia, Goiás, Minas Gerais e São Paulo são os mais relevantes (AULER et al., 2001).



Figura 2.4 – Distribuição das rochas carbonáticas e cavernas no Brasil (KARMANN; SALLUN FILHO, 2007)

A primeira classificação do carste brasileiro foi proposta por Karmann; Sánchez (1979). Os autores têm como mérito principal – além do pioneirismo – a definição das cinco principais províncias espeleológicas brasileiras: Vale do Ribeira (entre os estados de São Paulo e Paraná), Bambuí (englobando Minas Gerais, Bahia, Tocantins, Goiás e o Distrito Federal), Serra da Bodoquena (Mato Grosso do Sul), Alto Rio Paraguai (Mato Grosso) e Chapada de Ibiapaba (Ceará), divididas em distritos locais, além de outras nove áreas com fenômenos cársticos mais restritos. De forma geral, tais áreas são até hoje as de maior desenvolvimento de cavernas.

Posteriormente, Karmann; Sánchez (1986) incluíram outra província, a do Rio Pardo, além de duas areníticas, da Serra Geral e do Alto Rio Urubu. Em trabalhos mais recentes podem ser observadas denominações de regiões espeleológicas (AULER et al., 2001) ou áreas cársticas (AULER, 2002). Nestes últimos dois trabalhos citados, foram identificadas 14 áreas cársticas carbonáticas principais, além de ocorrências menores. A diferença entre as classificações dos trabalhos realizados por Karmann; Sánchez (1979, 1986) daqueles feitos por Auler et al. (2001) e Auler (2002) se deve às escalas adotadas no mapeamento e ao respectivo grau de conhecimento do assunto em cada época (LOBO et al., 2007).



Capítulo 3

SISTEMAS ATMOSFÉRICOS SUBTERRÂNEOS

Góticulas de condensação no teto,
na galeria do rio na caverna de Santana,
evidenciando o choque térmico e
a saturação hídrica do ar.

3. SISTEMAS ATMOSFÉRICOS SUBTERRÂNEOS

3.1. Aspectos gerais

A atmosfera das cavernas é marcada por singularidades que a diferenciam dos demais sistemas atmosféricos naturais, em função de fatores como o confinamento espacial, a ausência de luz e a baixa incidência de energia solar direta (BUECHER, 1999; CIGNA, 2004). Em conjunto com a litosfera, a pedosfera, a biosfera e a antroposfera (FORTI, 2009), constitui-se em elemento-chave de um sistema cárstico, intervindo em processos de transformação do meio físico (CIGNA; FORTI, 1986; FREITAS; SCHMEKAL, 2003) e na manutenção da fauna cavernícola (HOENEN; MARQUES, 2000; TRAJANO; BICHUETTE, 2006).

A atmosfera subterrânea apresenta processos físico-químicos de transferência e conservação de energia e massa semelhantes aos encontrados em sistemas atmosféricos da superfície terrestre, mas em intensidades atenuadas na maioria dos casos (LUETSCHER et al., 2008). A reposição energética ocorre a partir de fluxos gasosos e hídricos de troca com o ambiente externo, o qual recebe incidência direta da radiação solar, bem como sob influência geotermal. Embora a atmosfera subterrânea seja marcada por uma estabilidade térmica e composicional relativamente maior se comparada ao meio externo (LUETSCHER et al., 2008), esta condição não denota em sua classificação como um sistema fechado (BOURGÉS et

al., 2006). Trata-se, portanto, de um sistema aberto e homeostático, com ajustes controlados por mecanismos inter-relacionados de regulação, possibilitando a manutenção de uma condição primária de estabilidade, tal como descrevem Watson; Lovelock (1983) e Lovelock (2006), gerando a modelagem padrão do estado estacionário da atmosfera. Esta modelagem, dinâmica e homeostática, deve ser observada com cautela, devido o risco de instabilidade estrutural, que pode ser causado por pequenas mudanças no modelo (ABRAHAM, 2009). No caso de ambientes subterrâneos, esta mudança fundamental no modelo pode ser interpretada pela simplificação da biosfera, muito provavelmente incapaz de regular o ambiente em processo de retroalimentação, assim como sugerem, para os casos gerais, Williams (1992) e Lenton (1998). Todavia, trabalhos recentes têm demonstrado a retroalimentação existente entre a biosfera e a atmosfera, como no caso das cianobactérias oceânicas e a formação de nuvens, corroborando em parte com as hipóteses geofisiológicas de James A. Lovelock. Esta nova perspectiva vem sendo usada com maior frequência em estudos de dinâmica climática, em função dos princípios de vulnerabilidade do ambiente relativos à antropização (MERTZ et al., 2009). No caso das cavernas, embora o tema ainda não seja foco de estudos diretos, consideram-se possibilidades preliminares semelhantes para as cavernas que abrigam extensas colônias de morcegos em seu interior. A aglomeração de animais de sangue quente gera alterações na temperatura do ar, exercendo com isso um fator de regulação térmica no ambiente (MOREIRA; TRAJANO, 1992). Além disso, os excrementos gerados pelos morcegos se acumulam em grandes depósitos de matéria orgânica, que interagem com o meio físico tanto pelos gases gerados pela sua decomposição quanto pelos depósitos minerais de compostos orgânicos que geram até mesmo espeleotemas.

As especificidades espaço-temporais, geofisiológicas e geofisiográficas mencionadas permitem a compreensão da diferenciação dos sistemas atmosféricos subterrâneos, preliminarmente caracterizados em sua escala espacial como um microclima. Trata-se da menor escala espacial de análise atmosférica, variável entre poucos metros até 10 km, inferior ao mesoclima, que varia entre 10 e 2000 km, e ao macroclima, que corresponde às escalas superiores aos 2000 km (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Na dimensão vertical, Mendonça; Danni-Oliveira (2007) e Foken (2008) afirmam que a camada microclimática se estende até 100 m de altura do solo. No

entanto, Geiger (1951) afirma que esta espessura é variável, dependendo das condições de relevo, da cobertura vegetal e da urbanização, com o que concorda Bailey (2005). Apesar das definições cujo enfoque maior se dá na dimensão espacial, a caracterização do microclima está mais associada aos processos ocorridos em camadas superficiais da atmosfera, como os fluxos de energia e matéria, os processos de radiação junto ao solo e os efeitos da superfície subjacente (FOKEN, 2008). Carvalho (2001) alerta também que o microclima não se resume em um mero fenômeno atmosférico próximo ao solo, devendo ser compreendido como um meio ambiente em seu sentido mais imediato e funcional.

Todavia, os estudos mencionados anteriormente – à exceção de Carvalho (2001) – se referem às características do microclima em superfície. Para o sistema atmosférico subterrâneo, não existe um estudo específico que determine qual o termo mais adequado a ser usado para a sua correta designação. Exemplos encontrados em pesquisas anteriores foram o topoclima (MOREIRA; TRAJANO, 1992; FOKEN, 2008), o espeleoclima (CÉSAR Jr., 1980; ZELINKA, 2002; KRANJC; OPARA, 2002; PFLITSCH; PIASECKI, 2003) ou a espeleoclimatologia (PFLITSCH et al., 2006), a espeleometeorologia (PFLITSCH; PIASECKI, 2003), o criptoclima (BAILEY, 2005), o clima subterrâneo (MANGIN; ANDRIEUX, 1988; BADINO, 2004), a micrometeorologia (BADINO, 2009a) e o clima de caverna (PFLITSCH; PIASECKI, 2003; BADINO, 2004; CIGNA, 2005). Todavia, o termo microclima é, sem dúvida, o mais utilizado, conforme foi observado nos trabalhos de Dragovich; Grose (1990), Choppy; Cigna (1994), Hoyos et al. (1998), Sánchez-Moral et al. (1999), Freitas; Schmekal (2003), Fernández-Cortés (2006a, b), Piasecki et al. (2006) e Liñan et al. (2008).

Entretanto, as características espaciais dos ambientes cavernícolas condicionam uma nomenclatura mais focada para os sistemas atmosféricos subterrâneos. Assim, termos como espeleoclima ou então microclima subterrâneo ou cavernícola, se configuram como mais representativos para tais especificidades. No presente estudo, optou-se pelo termo espeleoclima.

Nos estudos atmosféricos de superfície, os principais elementos considerados nas análises de dinâmicas de circulação e definição de padrões são a temperatura, a umidade relativa e a pressão atmosférica, bem como os fenômenos decorrentes da interação entre estes elementos, como as chuvas, os ventos, a cobertura do céu (nuvens) e os sistemas atmosféricos atuantes. Isto se percebe em análises da

escola da climatologia geográfica rítmica do geógrafo Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro (ZAVATTINI, 2004) e em outras metodologias (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). No caso das cavernas, as principais variáveis consideradas nos estudos atmosféricos são a temperatura do ar (VILLAR et al., 1984a, b; MANGIN; ANDRIEUX, 1988; MANGIN et al., 1999; SÁNCHEZ-MORAL et al., 1999; KRANJC; OPARA, 2002; CALAFORRA et al., 2003; CIGNA, 2002a, 2004), a temperatura das rochas, espeleotemas e/ou do solo (PULIDO-BOSCH et al., 1997; BUECHER, 1999; LUETSCHER; JEANNIN, 2004; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006a), a temperatura dos corpos de gelo no interior das cavernas, quando eles existem (PFLITSCH et al., 2006; PIASECKI et al., 2006), a temperatura da água (MANGIN; ANDRIEUX, 1988; CIGNA, 2002b), a umidade relativa e absoluta do ar (DUBLYANSKY; DUBLYANSKY, 1998; BUECHER, 1999; CARRASCO et al., 2002; CIGNA, 2002a, 2004), a pressão atmosférica (CIGNA, 1967; MANGIN; ANDRIEUX, 1988; COLLAZO et al., 2007a, b), os fluxos de água (HEATON, 1986; BOURGES et al., 2001; CIGNA; CHOPPY, 2001; LUETSCHER; JEANNIN, 2004) e de ar (CIGNA, 1967, 2004; CIGNA; FORTI, 1986; BUECHER, 1999; CIGNA; CHOPPY, 2001; PFLITSCH; PIASECKI, 2003; LUETSCHER; JEANNIN, 2004) as taxas de concentração de CO₂ (BAKER; GENTY, 1998; DRAGOVICH; GROSE, 1990; HOYOS et al., 1998; SÁNCHEZ-MORAL et al., 1999; CARRASCO et al., 2002; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006b; FREITAS; SCHMEKAL, 2006; LIÑÁN et al., 2008) e de radônio (²²²Rn) (HAKL et al., 1996; CIGNA, 2005) e a condensação nas paredes, teto e espeleotemas (SÁNCHEZ-MORAL et al., 1999; CARRASCO et al., 2002; FREITAS; SCHMEKAL, 2003, 2006).

A variabilidade da dinâmica atmosférica destes elementos recebe influência do confinamento espacial (GEIGER, 1951; POULSON; WHITE, 1969; BAILEY, 2005), de sua estratificação vertical (TARHULE-LIPS; FORD, 1998; LUETSCHER; JEANNIN, 2004; BOURGES et al., 2006; BADINO, 2009a) da movimentação relativamente pequena de massa e energia (CIGNA, 1967), da menor disponibilidade ou ausência total de luz (GEIGER, 1951; POULSON; WHITE, 1969; BADINO, 2004; STOEVA; STOEVA, 2005) e da estabilidade relativa dos parâmetros físico-químicos, que por sua vez é proporcional ao confinamento espacial, à profundidade e distância do meio externo e ao número e posição dos acessos ao ambiente externo (GEIGER, 1951; CHOPPY; CIGNA, 1994; BAKER; GENTY, 1998; BAILEY, 2005; BOURGES et al., 2006; BADINO, 2009b). De um modo geral, a

atmosfera subterrânea vem sendo tradicionalmente classificada como um ambiente estático (GEIGER, 1961; CIGNA, 2004; BAILEY, 2005; BADINO, 2010; PFLITSCH et al., 2010), o que se observa, por exemplo, no exemplo ilustrado na Figura 3.1.

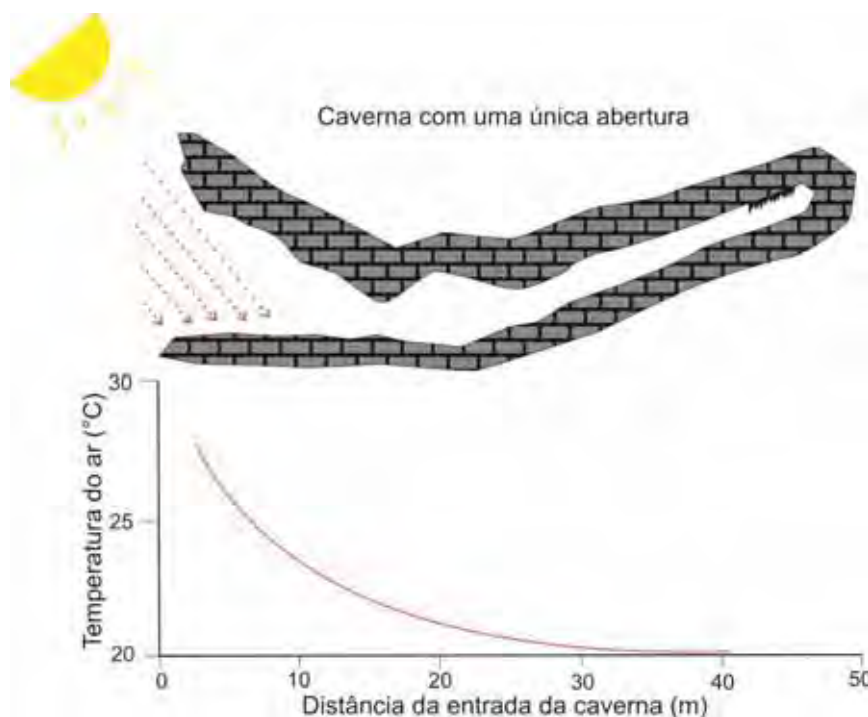


Figura 3.1 – Regime térmico de uma caverna com uma única entrada na região leste do Mediterrâneo. Adaptado de Geiger (1961) e Bailey (2005)

No exemplo citado, a variabilidade térmica é atribuída à distância da entrada, o que não deve ser tomado como regra ou modelo, atendo-se à explicação da caverna estudada. Diversos outros fatores tornam esta perspectiva mais sistêmica e diversificada, como a quantidade e dimensões dos acessos ao exterior, a presença de cursos d'água, a posição da caverna em relação às zonas climáticas do globo terrestre, a altitude em relação ao nível do mar, o seu desenvolvimento vertical e horizontal, a variação nos fluxos de ar, a estratificação térmica vertical nos condutos e salões de uma caverna e a condensação de água nas paredes, teto e espeleotemas. Em função disso, trabalhos recentes (e.g. BADINO, 2010; PFLITSCH et al., 2010) criticam esta perspectiva, evidenciando a necessidade de estudos em escalas espaciais e temporais mais detalhadas e amplas, para o conhecimento da atmosfera subterrânea. Isto mostra que a ideia geral de que uma caverna é um sistema atmosférico estável é equivocada.

A estabilidade do espeleoclima e a circulação de ar em seu interior dependem também das dimensões do sistema subterrâneo, da movimentação do ar por efeito barométrico (POULSON; WHITE, 1969; BADINO, 2009a; 2010; PFLITSCH et al.,

2010) e da complexidade dos possíveis níveis de galerias existentes. A Figura 3.2 ilustra exemplos de diferentes padrões básicos de circulação de ar que interferem no espeleoclima, em função das estações do ano e/ou do ciclo diuturno. Em sistemas complexos, é comum ocorrer uma mistura entre estes diferentes padrões.

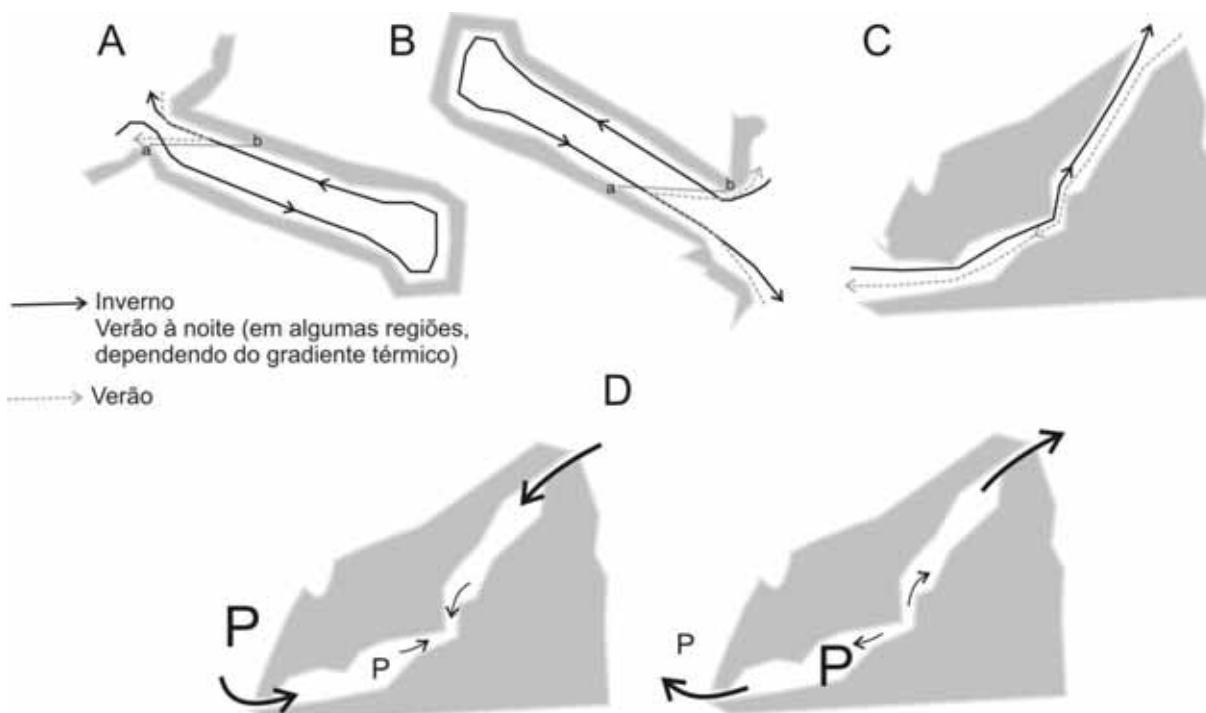


Figura 3.2 – Modelo conceitual, sem escala e com exagero vertical em A e B, ilustrando em cortes transversais diferentes padrões de circulação atmosférica subterrânea. Em A e B, cavernas tipo “saco de ar”, sendo A – armadilha para o ar frio; e B – armadilha para o ar quente. Os exemplos C e D referem-se a cavernas com maior dinâmica atmosférica, sendo C um modelo de circulação por diferença de temperatura e D de cavernas barométricas

As cavernas com desenvolvimento descendente em relação ao eixo horizontal (Figura 3.2A) são classificadas como armadilhas para a captura do ar frio. No inverno, o ar mais aquecido do interior da caverna flui para o meio externo. No verão, forma-se um bolsão de ar mais frio em seu interior (eixo a-b), limitando a circulação do ar a uma zona demasiadamente restrita, próxima da boca (ERASO, 1969; MANGIN; ANDRIEUX, 1988; CIGNA, 2004). Em cavernas com este perfil de desenvolvimento, em regiões mais frias do globo terrestre (latitudes ou altitudes mais altas), é comum a formação de corpos de gelo – em diversos casos, perenes – no interior destas cavernas (PFLITSCH et al., 2006; PIASECKI et al., 2006). No caso de cavernas com desenvolvimento ascendente em relação ao eixo horizontal (Figura 3.2B), a situação se inverte: o fluxo no verão é para baixo. No inverno, um bolsão de ar quente se forma a partir do eixo a-b, na zona interna, caracterizando uma

armadilha para a captura do ar quente (ERASO, 1969; MANGIN; ANDRIEUX, 1988; CIGNA, 2004).

Em cavernas com mais de uma entrada, a circulação de ar gera fluxos por meio de dois mecanismos: o gradiente térmico e a pressão atmosférica. No caso do gradiente térmico, a movimentação ocorre em função de um processo de termoequilíbrio, entre a temperatura do ar dentro e fora das cavernas. Nas estações quentes do ano, quando o ar exterior é mais quente que dentro da caverna, o ar mais frio e denso sai do interior da caverna por seu acesso inferior. No inverno, o ar fora da caverna fica relativamente mais frio que seu interior – e, portanto, mais denso –, impedindo a sua saída pelo acesso inferior (ERASO, 1969; BADINO, 2010; PFLITSCH et al., 2010). Nestas circunstâncias, o ar da caverna está relativamente mais quente, saindo pelo acesso superior, em uma movimentação chamada de “efeito chaminé” (Figura 3.2C). Badino (2010) faz reservas em relação ao uso deste termo, dado que as cavernas não se assemelham às chaminés, pois estas últimas possuem uma fonte de aquecimento de ar em seu interior. Pflitsch et al. (2010) acrescentam ainda que a temperatura de cavernas com esta dinâmica apresenta um notável gradiente vertical, sendo maior próxima ao acesso superior em relação ao inferior, considerando a média anual.

Por fim, as cavernas barométricas, onde a pressão atmosférica exerce papel fundamental na dinâmica de circulação de ar. Este tipo de circulação é comum em grandes sistemas subterrâneos (BADINO, 2010; PFLITSCH et al., 2010), como as cavernas com centenas de quilômetros dos Estados Unidos. Por outro lado, Pflitsch et al. (2010) relatam sua ocorrência em cavernas menores, de poucos metros, o que os leva a concluir que este tipo de circulação de ar em cavernas ainda carece de muitos estudos para ser mais bem compreendida. O exemplo da Figura 3.2D demonstra o esquema básico das cavernas barométricas, que devem ter dois ou mais acessos, além de ter o volume interno muito maior que os seus acessos restritos – embora Badino (2010) explique que o mecanismo de circulação barométrica do ar também é importante em cavernas com uma única entrada e/ou pequenas. Nelas, quando a pressão atmosférica externa é maior do que a interna, os fluxos de ar convergem para dentro do sistema por todos os seus acessos (em um dia de calor, por exemplo). Por outro lado, quando a pressão atmosférica externa diminui e fica menor que a de dentro da caverna, o ar do interior sai por todos os acessos (em um momento de chuva). Por fim, Pflitsch et al. (2010) pontuam que a

velocidade do ar é maior perto dos acessos do que no interior da caverna, tal como representado na Figura 3.2D, pela espessura das setas. Os autores lembram também que ao se falar em cavernas de circulação térmica ou barométrica, a referência se dá ao processo dominante no sistema analisado. Isto porque apenas em uma perspectiva teórica a circulação de ar se dá por apenas um dos mecanismos. Na prática, ambos coexistem e interferem em diferentes proporções na circulação de ar nos sistemas atmosféricos subterrâneos.

Outra forma de circulação de ar é a convecção. Badino (2010) explica que os impactos gerados em trechos pequenos e restritos de uma caverna podem ser propagados para todo o ambiente, por meio de correntes convectivas, mudando drasticamente a circulação de ar e o balanço térmico no ambiente. Um fenômeno deste tipo foi observado na gruta do Penhasco, em Buritinópolis-GO, onde o impacto higrotérmico gerado por três carbureteiras foi registrado em sensores em diversos pontos da caverna (LOBO; ZAGO, 2010).

Cigna (1967) e Badino (2010) explicam que a circulação do ar em cavernas ocorre por causas estáticas e dinâmicas. Como causas estáticas, podem-se mencionar as diferenças entre a densidade do ar dentro e fora das cavernas levando em conta a temperatura do ar, a umidade relativa e a sua composição química; e a variação na pressão atmosférica. Como causas dinâmicas, os fluxos de água dentro e fora das cavernas. Choppy; Cigna (1994) mencionam também que o espeleoclima de cavernas inteiras ou trechos de cavernas isolados do contato com a atmosfera externa podem ser diferentes do espeleoclima habitual. Os autores se referem a galerias isoladas por sifões, desabamentos ou dutos muito estreitos. O sistema atmosférico subterrâneo destas áreas resulta, normalmente, das trocas entre a água de percolação – e o gás que ela transporta – e a rocha encaixante.

Em cavernas complexas a circulação do ar também varia conforme o número de acessos ao meio externo, a diferença nas dimensões entre as galerias e salões e a distância entre os acessos (CIGNA, 2004). Quanto menor for a incidência solar sobre a caverna – pela restrição de seus acessos, em função da espessura da capa de rocha que a protege ou pela circulação de água e ar em relação ao meio externo – maior serão: a sua estabilidade climática (RACOVITA, 1975; STOEVA; STOEVA, 2005) e a influência recebida da energia geotermal (LUETSCHER; JEANNIN, 2004).

O espeleoclima é tradicionalmente classificado em três categorias (RACOVITA, 1975; LUETSCHER; JEANNIN, 2004; STOEVA; STOEVA, 2005). A zona

heterotérmica se localiza próxima aos acessos ao meio externo e recebe influências atmosféricas externas. A zona de temperaturas constantes (ou homeotérmica) se localiza em áreas relativamente mais profundas, onde predomina maior estabilidade térmica. Por fim, a zona transicional insaturada, que possui características intermediárias entre as outras duas. Todavia, esta classificação parte do pressuposto de que existe uma zona atmosférica estável no interior das cavernas, o que, como já comentado anteriormente, não reflete a realidade dos ambientes subterrâneos. Estudos recentes (e.g. LUETSCHER et al., 2008) têm demonstrado que a variação dos parâmetros atmosféricos em relação ao meio externo pode ocorrer mesmo em áreas mais remotas de uma caverna, colocando dúvidas sobre a efetividade desta classificação tradicional. Em outras palavras, a estabilidade térmica sugerida na Figura 3.1, talvez não seja tão linear quanto se pensa.

3.2. Espeleoclima e manejo ambiental

Além das razões intrínsecas para a compreensão do espeleoclima, como o conhecimento do clima atual e pretérito (LUETSCHER et al., 2008; BADINO, 2010), a aplicação de conhecimentos em espaços confinados em superfície (BAILEY, 2005), sua compreensão como ilhas ecológicas (BADINO, 2010) e as interferências de possíveis mudanças climáticas da Terra nos ambientes subterrâneos (BADINO, 2004, 2010; STOEVA; STOEVA, 2005), o seu estudo é igualmente importante para fins de conservação ambiental (CIGNA FORTI, 1988; ZELINKA, 2002; BADINO, 2010; MANGIN, 2010). Em muitas cavernas, a existência e manutenção de determinados elementos depende da estabilidade do ciclo habitual natural das condições atmosféricas, como no caso de pinturas rupestres (VILLAR et al., 1984b; PULIDO-BOSCH et al., 1997; MANGIN et al., 1999; SÁNCHEZ-MORAL et al., 1999; MANGIN, 2010), dos espeleotemas e rochas (CABROL, 1997; PULIDO-BOSCH et al., 1997; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006a), da biota cavernícola (HOENEN; MARQUES, 2000; RUSSELL; MACLEAN, 2007) e da interação entre estes elementos (BASTIAN; ALABOUVETTE, 2009).

Por conta destes fatores, o espeleoclima vem recebendo substancial atenção no caso de cavernas abertas ao turismo. Em um passado recente, a negligência conferida para as alterações nos parâmetros climáticos levou determinadas cavidades à proibição do uso público, como a caverna Candamo, na Espanha, cuja estrutura de visitação foi implantada em 1925, incluindo um sistema de iluminação

artificial. A degradação exacerbada do ambiente levou ao seu fechamento em 1979. Em 1989, a reabertura foi considerada e condicionada a estudos de capacidade de carga com base em parâmetros espeleoclimáticos (HOYOS et al. 1998). Outros exemplos de degradação do espeleoclima ou do meio físico em decorrência do impacto nos parâmetros atmosféricos são observados nos trabalhos de Pulido-Bosch et al. (1997) e Sánchez-Moral et al. (1999).

Há casos também onde as modificações e benfeitorias executadas para facilitar o uso turístico geram danos ambientais nas cavernas, levando a alteração da dinâmica da atmosfera subterrânea. Como exemplo, na caverna Glowworm, na Nova Zelândia, uma porta selada foi colocada na entrada superior. Com isto, foi necessário um controle rigoroso entre aberturas e fechamentos, de modo a não gerar excesso ou escassez de condensação nas paredes, prejudicando, desta forma, os processos naturais de deposição mineral, condensação e evaporação (FREITAS; SCHMEKAL, 2003). No caso da fauna cavernícola, os possíveis impactos das alterações espeleoclimáticas são ainda desconhecidos, em função da notória dificuldade de se estabelecer padrões de monitoramento (CULVER; SKET, 2002) e da falta de pesquisas direcionadas para o tema.

O monitoramento espeleoclimático para fins de manejo deve ser realizado em pontos-chave no interior e exterior de uma caverna (FREITAS, 2010), em quantidade de pontos que seja suficiente para exprimir a variabilidade espacial da caverna monitorada.

Outra característica importante no uso do espeleoclima para o manejo ambiental é a inovação técnica e tecnológica. Na atualidade, equipamentos de aferição em tempo real e registro simultâneo de dados permitem análises mais rápidas de séries mais amplas de dados, a um custo acessível (CIGNA, 2002a). Tais equipamentos precisam ser robustos, resistentes às condições adversas do ambiente e com grande precisão em seus sensores de leitura (CIGNA, 2002a; MANGIN, 2010). O uso de técnicas estatísticas também tem se consolidado, a partir de procedimentos como as análises de séries temporais (MANGIN et al., 1999; CALAFORRA et al., 2003; MANGIN, 2010), a geoestatística (FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006b; PIASECKI et al., 2006; LOBO; ZAGO, 2010) e os coeficientes de correlação (PULIDO-BOSCH et al., 1997; LIÑÁN et al., 2008). O rigor na coleta de dados também é de suma importância para a obtenção de resultados fiáveis. O uso de registradores automáticos é fundamental, distribuídos em toda a área sob

influência antrópica, pelo período mínimo de um ano (CIGNA, 2002b). Cigna (2002b) aponta a necessidade mínima de quatro registros diários; Zelinka (2002) apresenta intervalos variáveis entre dez minutos e uma hora, dependendo da finalidade do estudo; e Mangin (2010) apresenta exemplos com intervalo de coleta de quinze minutos, mas com séries históricas variáveis entre quinze e vinte anos.

Os estudos que relacionam o espeleoclima ao manejo ambiental são focados em três correntes distintas de análise: I) o manejo baseado na temperatura ambiente; II) os fluxos de energia e matéria e a dispersão de impactos antrópicos; e III) as concentrações de CO₂ e ²²²Rn e suas implicações ao ambiente e à saúde humana.

3.3. Manejo de cavernas baseado na temperatura ambiente

Em diversos lugares do mundo, o monitoramento climático em cavernas se iniciou em função do uso turístico, como na Eslováquia, em 1870 (ZELINKA, 2002) ou na Eslovênia, em 1884 (KRANJC; OPARA, 2002). Os atributos do espeleoclima se constituem nos parâmetros de utilização mais prática e aplicável ao manejo e gestão turísticos de cavernas. O elemento mais utilizado para este fim é a temperatura, considerando como parâmetros a sua variabilidade no ar, rocha e água, o que constitui o subsistema térmico.

A inter-relação entre estes parâmetros é constante e dinâmica, ocorrendo por meio de processos físicos de condução, convecção, advecção, condensação e radiação (ERASO, 1969; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007), variando em função de fatores como: a profundidade em relação à superfície e o grau de confinamento na caverna (FREITAS; SCHMEKAL, 2003; CIGNA, 2004; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006a; LUETSCHER et al., 2008); a temperatura da rocha (FREITAS; SCHMEKAL, 2003; LUETSCHER; JEANNIN, 2004); as correntes de ar originadas no exterior e/ou por convecção (CIGNA; FORTI, 1986; CIGNA, 2004; STOEVA; STOEV, 2005); a e o fluxo de água no sistema (STOEVA; STOEV, 2005) – que é muito mais influente nas alterações térmicas do que o fluxo de ar, em função de sua capacidade específica de reter o calor ser mais elevada (PFLITSCH; PIASECKI, 2003). Tradicionalmente, convencionou-se dizer que a temperatura da rocha reflete, em profundidades de até 50 m – excepcionalmente, em profundidades superiores a 100 m – a média anual histórica da temperatura do ar no ambiente externo (PFLITSCH; PIASECKI, 2003; LUETSCHER, JEANNIN, 2004), além de ser

o fator de prevalência na temperatura do ambiente subterrâneo (PFLITSCH; PIASECKI, 2003). Todavia, é equivocada a afirmação de que as cavernas possuem uma temperatura média semelhante à média anual da temperatura externa da região onde se localizam. Badino (2010) esclarece que esta proposição só serve para algumas regiões do globo terrestre – como as cavernas da zona temperada na Europa. Em pesquisas em cavernas mexicanas, o autor encontrou diferenças da ordem de 4 °C entre a média da temperatura externa e interna das cavernas, o que demonstra a variabilidade e a influência de outros fatores na temperatura da atmosfera subterrânea.

O estudo do subsistema térmico se baseia no monitoramento periódico destas variáveis em escalas temporais pré-definidas, considerando também aspectos como a interação com o clima externo, a variabilidade morfológica das cavernas, a pressão do uso turístico e as fontes artificiais de calor introduzidas, como os sistemas de iluminação (PULIDO-BOSCH et al., 1997; CIGNA; BURRI, 2000; KRANJC; OPARA, 2002; RUSSELL; MACLEAN, 2007).

Dos parâmetros deste subsistema, a temperatura do ar é usada amplamente para fins de manejo, sobretudo com o objetivo de determinar a capacidade de carga turística. Sua aplicação tem sido feita, geralmente, de três formas. A primeira deles é a limitação espacial da visitação em função dos impactos na temperatura. Nestes casos, em áreas onde a estabilidade térmica é maior, o acesso não é recomendado (e.g. FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006a, c). A segunda é a limitação temporal de acesso, em função da alteração da temperatura do ar causada pela permanência excessiva de pessoas em um determinado lugar (e.g. FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006a, b). Em cavernas estudadas na França, foi observada a modificação de espeleotemas em função da variação na temperatura a partir de alguns limites de permanência de pessoas no ambiente. Em alguns casos, o aumento da temperatura se reverteu rapidamente, enquanto que em outros, em função da inércia do ambiente, a estabilização ocorreu depois de um intervalo de tempo mais longo (CABROL, 1997). A mesma característica foi observada na cueva del Águila, Espanha, onde processos de acúmulo térmico foram observados em dias de visitação massiva da caverna, como em finais de semana e feriados (DOMÍNGUEZ-VILLAR et al., 2010). A terceira e última forma é a limitação do total de visitas diárias permitidas ou mesmo do total de pessoas em um grupo, em função da manutenção

das condições naturais de variação climática (e.g. HOYOS et al., 1998; CALAFORRA et al., 2003; LARIO; SOLER, 2010).

3.4. Parâmetros químicos da atmosfera: manejo ambiental e riscos aos visitantes

Em linhas gerais, os parâmetros químicos mais relevantes da atmosfera cavernícola para fins de manejo são a água dissolvida no ar e as concentrações de CO₂ e de ²²²Rn. Seu estudo se justifica por dois motivos principais: a conservação do ambiente e os potenciais riscos à saúde humana.

A gênese e o comportamento destes elementos no ambiente são, de certa forma, interligados (BATIOT-GUILHE et al., 2007). A água dissolvida no ar é proveniente dos fluxos subterrâneos e/ou meteóricos, por meio da circulação subterânea e da percolação. Estes mesmos processos possibilitam o acúmulo de CO₂, quer pelo carreamento de matéria orgânica nos rios – a qual posteriormente entra em decomposição –, quer pelo transporte por águas meteóricas do CO₂ originado no solo acima da caverna (BUECHER, 1999; CARRASCO et al., 2002; LIÑÁN et al., 2008).

A umidade relativa do ar é a porcentagem de água contida no ar a uma determinada temperatura em relação à sua capacidade máxima de retenção de umidade (HILL; FORTI, 1997; BUECHER, 1999; PALMER, 2007). Em zonas profundas de cavernas em regiões de maior pluviosidade, em grande parte dos casos, a umidade relativa e absoluta tendem a ser elevadas, próximas do ponto de saturação, devido a própria disponibilidade de água existente em função da percolação em rocha, levando a condensação da água nas paredes, teto e espeleotemas (HILL; FORTI, 1997; PALMER, 2007). A umidade relativa do ar é um dos principais fatores atmosféricos que influenciam o crescimento ou a redução dos espeleotemas (HILL; FORTI, 1997). A umidade relativa é apresentada em uma escala percentual, variando conforme a temperatura ambiente e a quantidade de água disponível em um metro cúbico de ar (Figura 3.3).

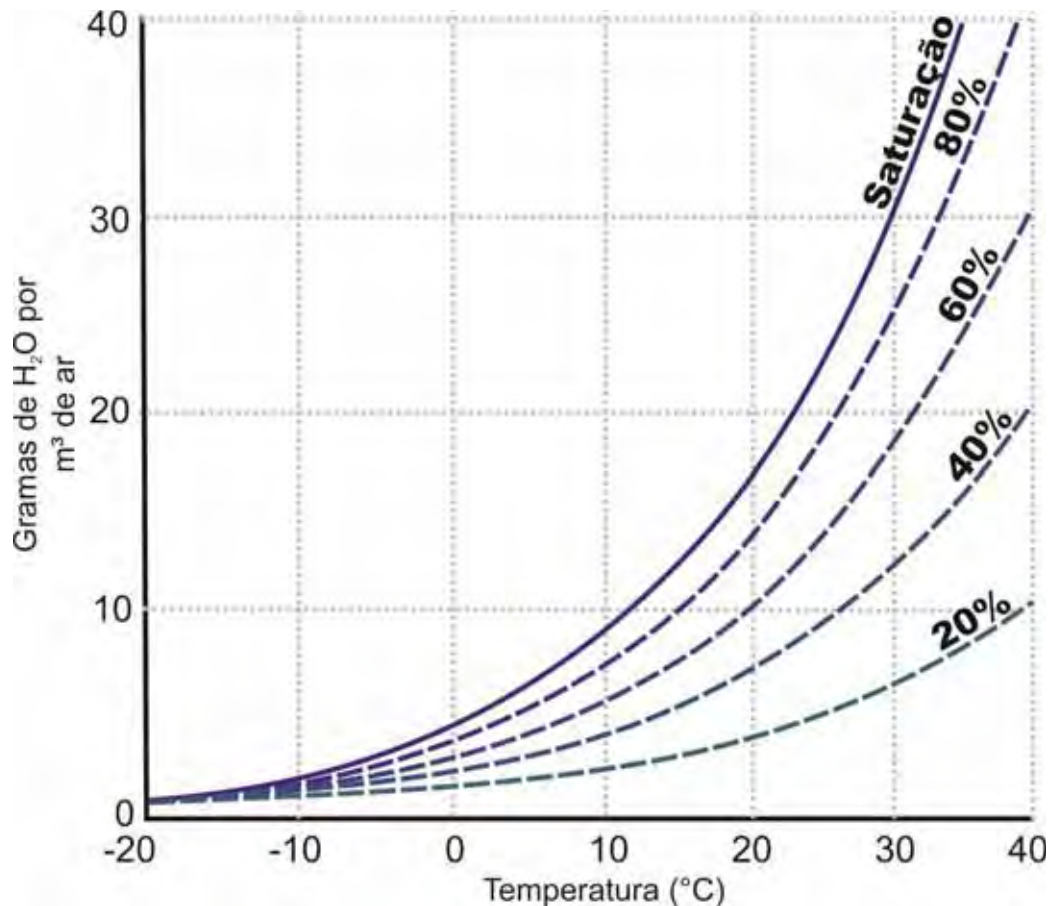


Figura 3.3 – Variação da umidade relativa do ar em função da temperatura (STRAHLER, 1971)

Em um exemplo dado por Palmer (2007), se uma massa de ar está fora de uma caverna a uma temperatura aproximada de 30 °C e com umidade relativa em torno de 60%, ao adentrar na caverna sua temperatura diminui, entrando rapidamente em saturação. Dublyansky; Dublyansky (1998) afirmam que nestes casos, ocorre condensação de parte da água dissolvida na atmosfera, atuando tanto na espeleogênese e na formação de espeleotemas quanto na sua corrosão, dependendo do nível de agressividade da solução condensada. As alterações decorrentes da implantação do espeleoturismo, como a abertura de acessos artificiais, colocação de portas em acesso naturais ou mesmo a presença humana, também podem ser indutores da geração de condensação nas paredes, teto e espeleotemas de uma caverna (FREITAS, 2010; DOMÍNGUEZ-VILLAR et al., 2010; FREITAS; SCHMEKAL, 2003, 2006). Como exemplo, Domínguez-Villar et al. (2010) demonstram em um modelo teórico a formação de condensação em função da presença humana (Figura 3.4).

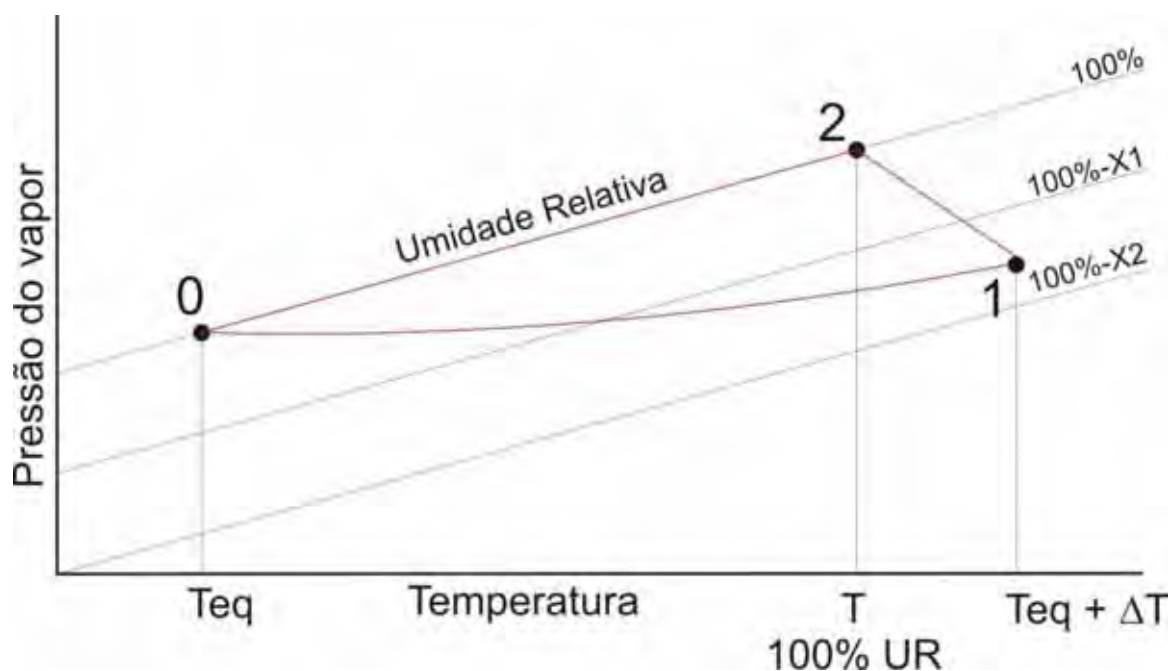


Figura 3.4 – Modelo teórico da relação entre a temperatura do ar e a pressão do vapor ilustrando as mudanças na atmosfera subterrânea em função da visita (DOMÍNGUEZ-VILLAR et al., 2010)

Na Figura 3.4, assume-se uma umidade relativa de 100% no estágio 0, e uma temperatura do ar equilibrada com a rocha da caverna. Com a entrada de visitas, a temperatura do ar aumenta até atingir o estágio 1, causando a redução da umidade relativa do ar, o que resulta em evaporação e aumento da pressão do vapor. Quando os visitantes deixam a caverna, a temperatura do ar começa a diminuir, buscando retornar ao seu estado estacionário de equilíbrio dinâmico com a rocha. Neste intervalo, a evaporação ainda continua, até que a saturação atinga o estágio 2 e, então, a condensação se inicia. Por fim, o sistema retorna ao seu estágio inicial de equilíbrio, enquanto a condensação se mantém nas rochas da caverna (DOMÍNGUEZ-VILLAR et al., 2010).

O estudo higrômico também se baseia no monitoramento periódico das variáveis, com alguns fatores de complicação. Alguns instrumentos que aferem a umidade do ar apresentam problemas com a condensação de partículas em seu sensor de leitura, interferindo nos resultados obtidos (CIGNA, 2002a). Além disso, existe uma variabilidade higrômica no ar, causada por movimentos catabáticos (BAILEY, 2005; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006b), de modo que a umidade relativa do ar é maior próxima ao teto. Estudos feitos por Forbes (1998) demonstram a existência de uma estratificação vertical da umidade: a 1,2 m do solo, a umidade relativa é menor – em função do aumento na circulação de ar. A partir desta altura a

umidade aumenta, muito provavelmente, influenciada pela proximidade com a condensação existente nas paredes e teto das cavernas.

Para a aferição da condensação, ainda não existem métodos amplamente difundidos. Até o presente, os trabalhos de Freitas; Schmekal (2003, 2006) apresentam os resultados mais eficazes e promissores para este tipo de monitoramento. Por outro lado, a umidade do ar não tem sido amplamente utilizada como parâmetro fundamental de manejo ambiental. As exceções encontradas são aquelas que a relacionam com a condensação e com a concentração de CO₂.

Sobre o CO₂, Simon et al. (2007) detalham a sua origem em cavernas, considerando a entrada de carbono orgânico particulado (POC) e carbono orgânico dissolvido (DOC). Este último predomina nos ambientes subterrâneos, em função da entrada de corpos d'água, pelo processo de dissolução de CaCO₃ por meio da percolação, que libera CO₂ quando a solução saturada entra em contato com a atmosfera subterrânea (FORD; WILLIAMS, 2007; PALMER, 2007; LIÑÁN et al., 2008). A percolação também é responsável pela liberação do ²²²Rn das rochas, que se origina do decaimento do Urânio (²³⁸U), elemento que está sempre presente nos solos e nas rochas por onde a água se infiltra (BUECHER, 1999; ALBERIGI, 2006; CAMPOS et al., 2006; ALBERIGI; PECEQUILO, 2008).

A relação entre os parâmetros químicos do ambiente e a sua conservação advém do equilíbrio dinâmico existente entre a atmosfera subterrânea, a rocha matriz e os depósitos de minerais secundários, os espeleotemas. A interação existente entre estes elementos ocorre por meio de processos como: a dissolução da rocha matriz por águas de percolação; a geração de soluções aquosas saturadas de CaCO₃ e CO₂; e a deposição de CaCO₃ quando do contato com a atmosfera subterrânea em função da liberação do CO₂ presente na água (DREYBRODT, 2004a). De um modo geral, o processo é ilustrado na Figura 3.5 e na Equação 3.1 (JAMES, 2004a).

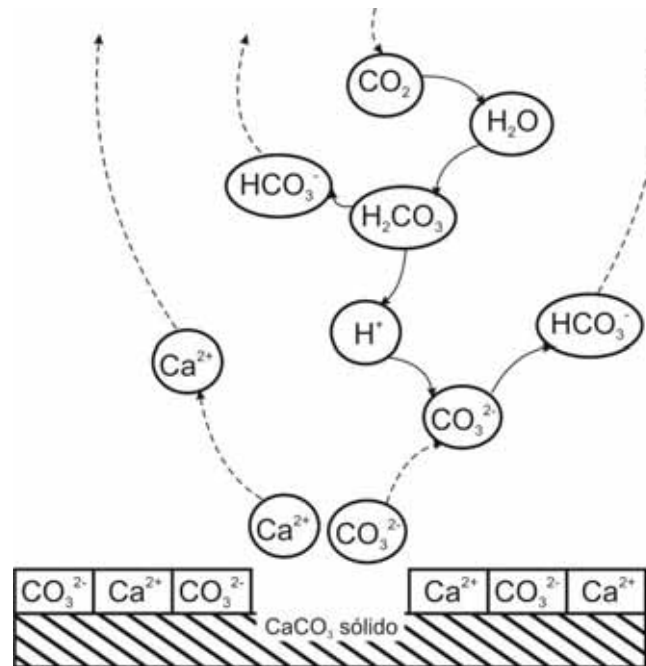
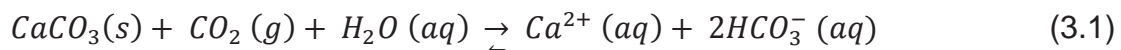


Figura 3.5 – Diagrama de reações químicas (linhas contínuas) e transporte de moléculas (linhas pontilhadas) durante o processo de dissolução (DREYBRODT, 2004b)

Dissolução →



← Precipitação

Tomando por base o CO_2 , duas condições são básicas para a dissolução ou precipitação do CaCO_3 : a) o nível de saturação da concentração de CO_2 na água (DREYBRODT, 2004b; JAMES, 2004a, b), o qual depende do volume de água entrando em percolação na rocha e da atividade biológica nos solos (BUECHER, 1999); e b) a concentração de CO_2 na atmosfera cavernícola (FERNÁNDEZ-CORTÉS, 2004). Além disso, variações em escala anual ou de maior intervalo de tempo na concentração de CO_2 na atmosfera subterrânea também podem levar a corrosão natural em ambientes típicos de deposição, como os espeleotemas (BAKER; GENTY, 1998). Todavia, na maioria dos casos, as baixas variações nas concentrações de CO_2 favorecem a precipitação da calcita, face ao equilíbrio dinâmico existente com a atmosfera subterrânea (LUETSCHER et al., 2008).

Em estudos feitos na caverna Candamo, Espanha, Hoyos et al. (1998) encontraram concentrações de CO_2 na água que eram entre três e sete vezes maiores que as da atmosfera subterrânea. Pulido-Bosch et al. (1997) mencionam que, em alguns casos, esta proporção pode atingir grandezas superiores a vinte

vezes. No mesmo trabalho, os autores também apontam uma estreita relação entre a concentração de CO₂ no ar e a distância do ponto monitorado em relação à entrada da caverna Candamo, Espanha – quanto mais distante, maior a concentração. Song et al. (2000) constataram esta mesma correlação espacial na caverna Bayun, China, assim como Fernández-Cortés et al. (2006a) na caverna d'Água, Espanha. Dragovitch; Grose (1990), mencionam que a concentração mínima para a ocorrência de corrosão da calcita em espeleotemas é de 2400 ppm. Embora este valor seja usado como parâmetro para algumas ações de gestão da caverna Glowworm, na Nova Zelândia, Freitas (2010) alerta ainda para que este não seja tomado como um parâmetro universal, pois os níveis de resposta e os padrões de corrosão mudam em cada caverna, variando, por exemplo, conforme a concentração de íons de cálcio na água de percolação, como constatado por Baker; Genty (1998). Além disso, estudos feitos em cavernas espanholas demonstram empiricamente a ocorrência de corrosão por condensação induzida pela presença humana, considerando variações da ordem de 500 ppm (SÁNCHEZ-MORAL et al., 1999) e até mesmo 100 ppm (HOYOS et al., 1998), tendo como base valores muito abaixo da grandeza de 2400 ppm

Como mencionado, a visitação turística pode acarretar no aumento momentâneo na concentração de CO₂ no ar. Milanolo; Grabrovsek (2009) calcularam em dois experimentos acréscimos de origem humana variáveis entre 0,35 e 0,45 l CO₂ min⁻¹ pessoa⁻¹. Freitas (2010) acrescenta que a respiração humana exala ar mais quente que o ambiente da maioria das cavernas, com um volume aproximado de 4% de CO₂ e com grande quantidade de vapor d'água. Este aumento na concentração de CO₂, ainda que pontual, aliado a umidade da respiração e do próprio ambiente, teoricamente pode ser dissolvido em meio aquoso, nos gotejamentos e na condensação. A solução resultante deste fenômeno pode se tornar novamente agressiva, corroendo as rochas carbonáticas, em um processo conhecido como corrosão por condensação (PULIDO-BOSCH et al., 1997; BAKER; GENTY, 1998; SARBU; LASCU, 1997; HOYOS et al., 1998; CARRASCO et al., 2002; JAMES, 2004a, b, c; COLLAZO et al., 2007a; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006b). Assim, a dissolução que ocorre majoritariamente na rocha matriz (cf. Figura 3.5 e Equação 3.1, da esquerda para a direita), passa a se intensificar em ambientes de deposição, onde o processo dominante é a precipitação de minerais

(Equação 3.1, da direita para a esquerda). Com isso, o fluxo da equação se inverte parcialmente neste caso, tal como representado na Figura 3.6.

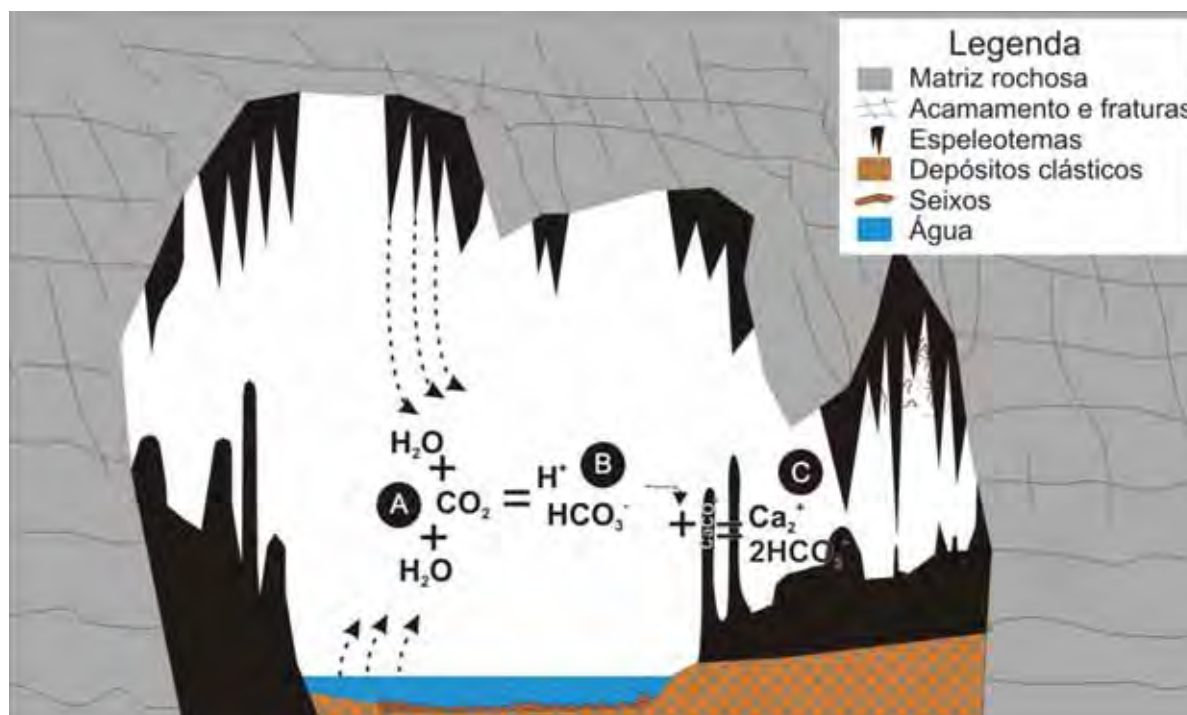


Figura 3.6 – Ilustração conceitual simplificada de um processo de corrosão por condensação

A Figura 3.5 ilustra que a água dissolvida no ar reage com o gás carbônico (A), gerando uma solução de ácido carbônico (B), que conforme a circulação do ar e o gradiente térmico entre o ar e a rocha, se condensa sobre os espeleotemas de carbonato de cálcio, dissolvendo-os lentamente (C) (SARBU; LASCU, 1997; DREYBRODT et al., 2005). Por outro lado, as pesquisas de Domínguez-Villar et al. (2010) demonstraram que no caso por eles estudado, a condensação não foi suficiente para gerar corrosão na caverna, o que pode variar em função da magnitude da visitação e do processo de condensação dela decorrente, entre outros fatores (BAKER; GENTY, 1998; DOMÍNGUEZ-VILLAR et al., 2010).

O monitoramento da umidade relativa e da temperatura do ar em conjunto com a variação na concentração de CO_2 é fundamental para fins de manejo ambiental espeleológico. Fernández-Cortés (2004) acrescenta que a precipitação de calcita é maior em ambiente de menor umidade do ar, favorecendo a evaporação de água da percolação. Por outro lado, a temperatura exerce papel importante na taxa de solubilidade do CO_2 na água, que é inversamente proporcional a temperatura. O monitoramento deve obedecer também a um ciclo sazonal no mínimo anual. As

pesquisas de Liñán et al. (2008) na caverna Nerja, Espanha, demonstram que a interferência antrópica na concentração de CO₂ no ar pode variar não somente em função do fluxo de visitação, mas também conforme a época do ano.

A existência de amplitude térmica é fundamental para a ocorrência de condensação e possível corrosão posterior (JAMES, 2004c; DREYBRODT et al., 2005), de modo que variações da ordem de 10 °C podem gerar montantes de corrosão da ordem de 0,3 µm/ano – em caso deste valor corresponder à amplitude anual – à 3 µm/ano – caso o valor corresponda à amplitude diária (DREYBRODT et al., 2005). Em pesquisa conduzida em cavernas no Caribe, Tahule-Lips; Ford (1998) constataram a ocorrência de corrosão por condensação na zona de entrada das cavernas monitoradas, onde a influência do clima externo é maior e ocorre uma variação térmica diária.

Os fluxos de ar e água também precisam ser monitorados. A movimentação gasosa é responsável pela dispersão ou acúmulo das variações físicas e químicas do ar, o que pode interferir no ambiente subterrâneo. A concentração de CO₂ possui grande dependência dos fluxos de ar, o que interfere diretamente nos processos de liberação de CO₂ na atmosfera por meio da percolação e/ou da deposição de carbonatos (KOWALCZK; FROLICH, 2010).

Além disso, a existência de padrões de dispersão gasosa contribui para o retorno mais rápido dos padrões naturais de concentração de CO₂ no ar a partir da visitação turística. Este fator é fundamental, considerando a velocidade da transferência do CO₂ do ar para a água para que ocorra a dissolução da calcita. Neste ponto, os autores consultados não apresentaram um consenso, dado que para James (2004b), esta velocidade é lenta, enquanto que para Dreybrodt et al. (2005) a água condensada nas paredes entra rapidamente em equilíbrio com o CO₂ dissolvido no ar. Com base em dados coletados na caverna Candamo, Espanha, Hoyos et al. (1998) demonstraram teoricamente que um aumento de 0,15 °C e de 110 ppm de CO₂ no ar – considerando a umidade relativa do ar sempre constante, próxima a 100% – permitiria um aumento na taxa de dissolução de calcita na rocha da ordem de aproximadamente 7,3%. Apesar de não terem obtido a comprovação prática do dado, o valor serve como uma referência inicial. Embora a alteração tenha ocorrido a despeito de uma estabilização rápida – duas horas para a temperatura e sete horas para o CO₂ –, os dados foram obtidos na época do ano de menor concentração de CO₂ na caverna, quando as alterações antrópicas podem ter sido

mais substanciais. Em outro estudo, conduzido na caverna Cisarska, na república Tcheca, Faimon et al. (2006) concluíram que a concentração de CO₂ de origem antrópica somente atingiria níveis críticos em condições extremas de visitação – como exemplo, para o caso estudado, grupos de mais de 100 pessoas permanecendo mais de 4h dentro da caverna.

O CO₂ em altas concentrações também apresenta riscos para a saúde humana, até mesmo porque a sua produção advém de um processo de oxidação, o qual, por consequência, diminui a disponibilidade de O₂ no ambiente. Este processo pode ser agravado em cavernas que se constituem como “armadilhas térmicas” (Figura 3.2), bem como pela disponibilidade de matéria orgânica (BADINO, 2009b).

Outro grande risco atmosférico em cavernas está relacionado à concentração do isótopo ²²²Rn. Trata-se de um gás da série do Urânio (²³⁸U), que se desprende das rochas por difusão ou transporte em meio aquoso (CIGNA, 2005). Seu decaimento ocorre em 3.82 dias, gerando uma série de partículas atômicas conhecidas como filhos do ²²²Rn. Estes se fixam rapidamente à poeira ou à água dissolvida no ar, podendo ser inalados e se concentrar no pulmão, sendo considerados carcinogênicos (BUECHER, 1999; CRAVEN; SMITH, 2006). O foco maior de preocupação, como já constatado em estudos de compilação (CIGNA, 2005; CRAVEN; SMITH, 2006) e outros específicos em cavernas estadunidenses (BUECHER, 1999) e italianas (CIGNA, 2005), é a saúde de pessoas que ficam expostas por um tempo maior ao ambiente subterrâneo, como guias de turismo, sendo que pesquisadores, espeleólogos e turistas não apresentam níveis alarmantes de frequência ao ambiente.

Além das questões relacionadas à saúde humana, estudar a concentração do ²²²Rn em cavernas é também importante para compreender a circulação do ar em seu interior (HAKL et al., 1996; BUECHER, 1999; BATIOT-GUILHE et al., 2007). Em cavernas horizontais, a concentração de ²²²Rn se correlaciona ao gradiente térmico, enquanto que em cavernas verticais, o fator preponderante de correlação é a pressão atmosférica (HAKL et al., 1996).

3.5. Fluxos de energia e matéria e a dispersão de impactos antrópicos

3.5.1. Fluxos de ar

A existência de fluxos de ar em direção ao meio externo se constitui em possibilidade de prevenção e dispersão dos impactos antrópicos, tornando as

cavernas com estas características mais propícias ao uso turístico de baixo impacto ambiental. Além disso, Bourges et al. (2001), Fernández-Cortés et al. (2006b), Liñán et al. (2008) e Kowalczk; Frolich (2010) acrescentam que a circulação atmosférica subterrânea é fundamental para a compreensão do acúmulo de CO₂ no ar. Por outro lado, correntes de ar ascendentes e/ou em direção ao interior das cavidades podem gerar impactos cumulativos no ambiente, o que reforça a importância do conhecimento da dinâmica atmosférica subterrânea.

As correntes de ar em conjunto com os fluxos de água são os grandes responsáveis pelo equilíbrio térmico por advecção na atmosfera subterrânea. Em cavernas “fósseis”, sem a presença de água, os fluxos de ar – ainda que muito tênues – são tipicamente os mais relevantes (LUETSCHER et al., 2008).

A grande dificuldade para aferição dos fluxos de ar é a escala de precisão necessária nos instrumentos utilizados, uma vez que a velocidade atingida, em grande parte dos casos, é da ordem de décimos ou centésimos de metros por segundo. Por outro lado, os fluxos também podem ser inferidos a partir da existência e da posição de determinados tipos de espeleotemas (Figura 3.7), como algumas helictites e coralóides (QUEEN, 1981, 2009; HILL; FORTI, 1997; PALMER, 2007), das diferenças na pressão atmosférica (LUETSCHER et al., 2008; BADINO, 2009a), ou mesmo calculados, em função das diferenças encontradas nos ambientes interno e externo nos parâmetros atmosféricos de uma caverna (KOWALCZK; FROLICH, 2010). Em linhas gerais, os fluxos de ar são induzidos por diferenças térmicas, de densidade e de pressão entre a atmosfera interna e externa das cavernas (BUECHER, 1999; CIGNA, 2002a, 2004; PALMER, 2007). Outro indicador confiável é a taxa de concentração de gases como o CO₂ e o ²²²Rn, que são considerados como bons traçadores para a análise de fluxos de ar em cavernas (HAKL et al., 1996; CIGNA, 2005; BADINO, 2009b).



Figura 3.7 – Planta baixa sem escala, com a direção dos fluxos de ar na caverna Carlsbad, EUA, inferida por meio da orientação direcional de espeleotemas tipo pipoca (QUEEN, 1981)

Além da inferência por espeleotemas – que pode ser útil para demonstrar um padrão no longo prazo, mas é inviável para exprimir as variações sazonais horárias –, os fluxos de ar podem ser monitorados por instrumentos de avançada tecnologia, como os anemômetros ultrassônicos (FREITAS, 2010; PFLITSCH et al., 2010) ou anemômetros de filamento quente (*hot wire*) quando os fluxos são mais evidentes.

Por fim, existe também a possibilidade de uso de traçadores químicos, como o Perfluorocarbono (PFT), testado como sucesso em cavernas no trabalho de Christoforou et al. (1996).

A aferição da intensidade e fluxo das correntes de ar deve considerar que em diferentes épocas do ano os fluxos de ar se direcionam para áreas distintas, por vezes para fora ou para dentro da caverna (MANGIN; ANDRIEUX, 1988; CIGNA, 2004; COLLAZO et al., 2007b; BADINO, 2010; KOWALCZK; FROLICH, 2010; PFLITSCH et al., 2010). Em função desta sazonalidade, teoricamente, os impactos gerado pela presença humana na atmosfera cavernícola podem adquirir padrão cumulativo em determinadas épocas, ao invés de dispersivo.

3.5.2. Fluxos de água

Tal como o ar, a movimentação da água em direção às ressurgências de uma caverna pode também contribuir para a renovação da atmosfera cavernícola e para a dispersão dos impactos da visitação. A movimentação gera deslocamento de

camadas de ar em contato com a água (CIGNA, 1967, 2002a), além de alterar a sua temperatura e umidade (CIGNA, 1967, 2002a; BADINO, 2010). Mesmo em cavernas com lagos ao invés de rios em seu interior, a variação no nível d'água interfere na circulação atmosférica por “efeito pistão”, gerando fluxos decorrentes de ar (PULIDO-BOSCH et al., 1997).

De um modo geral, estes fluxos são classificados em níveis de intensidade de circulação de energia, com três classes distintas. O nível baixo de circulação de energia corresponde à mínima movimentação de água, como gotejamentos e escorrimentos. O nível moderado corresponde aos cursos d'água perenes e com movimentação regular. O nível alto corresponde aos cursos d'água que passam por inundações periódicas e/ou possuem trechos encachoeirados, alterando periodicamente as condições naturais da atmosfera e até mesmo do meio físico, promovendo verdadeira renovação no ambiente (HEATON, 1986). As cavernas ou trechos delas com águas circulantes em seu interior são muito menos susceptíveis aos impactos da presença humana do que aquelas de níveis mais baixo de energia, por vezes até secas, onde a dispersão dos impactos é mais difícil (FREITAS, 2010).

3.6. Espeleoclima no Brasil

No Brasil, os estudos espeleoclimáticos ainda estão em fase de iniciação. Considerando o acervo histórico da biblioteca da Sociedade Brasileira de Espeleologia e os bancos de dados pesquisados, foram encontrados 31 trabalhos sobre perfilagem ou monitoramento espeleoclimático feitos no país, além de outros estudos pontuais, em sua maioria realizados por biólogos em momentos de coleta de fauna, (e.g. TRAJANO, 1991) mas que não foram considerados na presente análise. Do montante de trabalhos identificados, destacam-se três dissertações de mestrado: uma na gruta Olhos d'Água, em Castro-PR; outra na gruta do Lago Azul, em Bonito-MS; e a terceira, em dez cavernas do Parque Estadual Intervales, em Ribeirão Grande-SP; além de outros dois trabalhos de pós-graduação em andamento: uma pesquisa sobre Radônio nas cavernas do PETAR e alguns resultados parciais da presente pesquisa.

Diferente de outros países, onde monitoramentos de décadas são realizados, os estudos mais extensos feitos no país não chegam a atingir dois anos de monitoramento contínuo. Além disso, em sua maioria estão centrados em aferições pontuais de temperatura do ar ou monitoramentos periódicos da temperatura e

umidade relativa do ar. A evolução temporal destes estudos é nitidamente perceptível, dividida para efeitos de análise em três fases: os perfis exploratórios dos anos 1960 e 1980; os monitoramentos pioneiros dos anos 1990; e os estudos e monitoramentos atuais, iniciados após a virada do século XXI.

3.6.1. Primeira fase: os perfis exploratórios dos anos 1960 e 1980

Os primeiros estudos relacionados à atmosfera subterrânea no Brasil foram feitos por membros de grupos de espeleologia. Em meados dos anos 1960 e 1970, era comum a realização de registros pontuais e perfis de temperatura e umidade relativa do ar, com termômetros e psicrômetros manuais, nos trabalhos de exploração espeleológica.

Os registros mais antigos encontrados datam de 1966 e 1967, na Revista da Escola de Minas (REM), da Universidade Federal de Ouro Preto-MG. Nelas são feitos relatos de um trabalho de campo de 1965 da Sociedade Excursionista Espeleológica (SEE) à gruta da Tapagem, mais conhecida como caverna do Diabo, em Eldorado-SP. Na ocasião foi desenvolvido um estudo de “meteorologia hipógea”, por Sérgio Almeida Junqueira e Rafael de Fuccio Júnior, com o objetivo de compreender a circulação de ar em seu interior. A metodologia empregada se baseou em um monitoramento de quatro dias, com perfil em dez pontos para a temperatura e umidade relativa do ar e de quatro pontos para temperatura da água. Além disso, foi inferido o vento dentro da cavidade. As conclusões apontaram para a alta umidade relativa do ar, um fluxo de ar adentrando a caverna, e uma temperatura média mais elevada no salão da Catedral (MATOS, 1966; KRÜGER, 1967). Da SEE vem também o segundo relato encontrado, com diversas aferições de temperatura e umidade relativa do ar na gruta da Água Suja, em Iporanga-SP (LEAL, 1969).

Nos anos de 1970 a quantidade de trabalhos pontuais sobre a atmosfera subterrânea cresce sensivelmente. No boletim Espeleo-Tema n°. 7, de 1976, Guy C. Collet relata sobre a necessidade de se fazer um “perfil isotérmico do laboratório: correnteza e temperaturas, modificações com a permanência de pessoal no interior” (COLLET, 1976b, p. 8). Também enfatiza o projeto de realização de perfil térmico do ar e da água, em relação à meteorologia externa. Tais trabalhos se referem ao laboratório subterrâneo montado na gruta Laboratório I, em Iporanga-SP, que funcionou durante a década em questão. No mesmo ano, na edição n°. 8 do boletim citado, Temperini (1976) apresenta um pequeno parágrafo, descrevendo as

características do espeleoclima. A autora faz menção a estudos no exterior, o que leva a crer que, àquela época, ainda não existiam pesquisas brasileiras sendo desenvolvidas sobre o tema. Na mesma edição, Peter Slavec apresenta dados referentes a estudos hidrológicos no sistema Areias, em Iporanga, o que inclui aferições pontuais da temperatura da água (SLAVEC, 1976a). Também é notável o esforço de Luiz Guilherme Assunção, em descrever no seu relatório da exploração realizada em abril de 1966, na caverna da Marreca, em Iporanga, o provável fluxo de circulação de ar em seu interior, chegando a preparar um esboço em corte transversal (ASSUNÇÃO, 1976), reproduzido na Figura 3.8A.

A aferição pontual de temperatura do ar e, se possível, da água, era uma atividade rotineira das expedições espeleológicas desta época. Muitos trabalhos mencionam a média de temperatura, tais como: Silva (1975), para as grutas do Boquete, Capim Vermelho, do Desenho e Tatu; Coura; Hashizume (1975) para as grutas do Índio e Bonita, ambos em Januária-MG; Gusso (1976) para as grutas Alambari de Baixo e de Cima, em Iporanga-SP; Slavec (1976b) para a abismo de Furnas, no mesmo município (esboço e perfil térmico em corte vertical na Figura 3.8B); Milko (1984), com medições feitas em 1979 no sistema São Mateus, Goiás; e González; Zavan (1986), com medições pontuais de temperatura do ar e da água para as cavernas Santana, Morro Preto, Couto, Água Suja, Ouro Grosso, Alambari de Cima, Alambari de Baixo, Areias e Laboratório I, todas em Iporanga-SP.

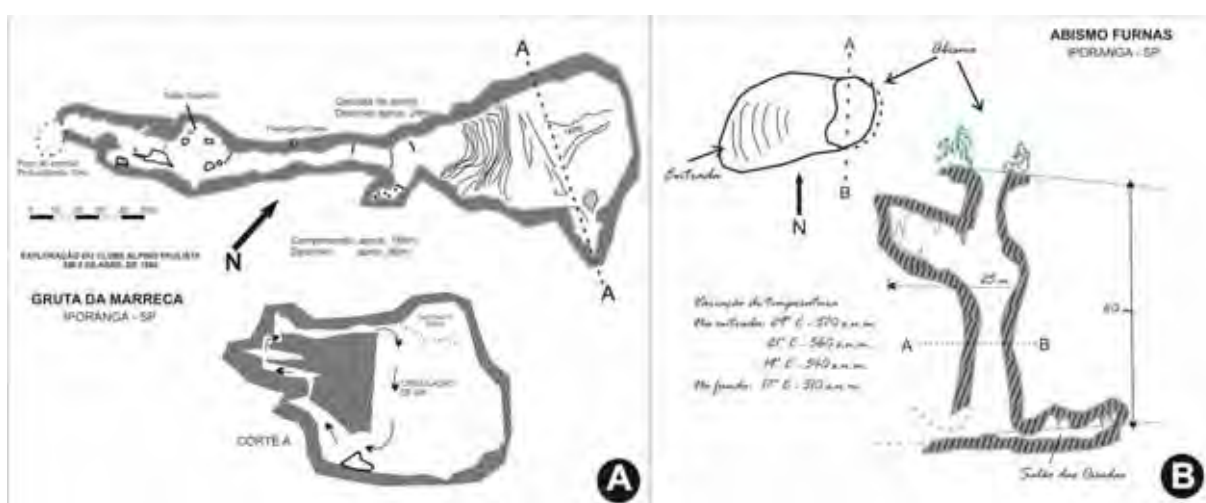


Figura 3.8: A – gruta da Marreca, apresentando planta baixa e esquema básico de circulação de ar em corte transversal em seu interior (ASSUNÇÃO, 1976); B – abismo de Furnas, com anotações de temperatura do ar estratificadas verticalmente (SLAVEC, 1976b)

Três trabalhos se destacam nesta primeira fase, por apresentarem maior consistência teórica, detalhamento metodológico e uma contribuição inicial à espeleologia brasileira sobre a atmosfera subterrânea.

O primeiro deles foi publicado nos *Anais do X Congresso Nacional de Espeleologia*, de autoria de Francisco Pavia. Em sua pesquisa teórica o autor faz considerações sobre a diversidade espeleoclimática das cavernas, sua relação com a conservação de vestígios arqueológicos, a alta umidade do ar e, principalmente, da circulação de ar em função da diversidade morfológica das cavernas (PAVIA, 1975), sob influência de pesquisadores europeus, como o espanhol Noel Llopis-Lladó e o francês Félix Trombe.

O segundo, de Nelson da Silva César Júnior, foi publicado nos *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Espeleologia*, em 1980. O autor apresentou resultados de sua pesquisa realizada na gruta do Laboratório, em Iporanga. Para tanto, instalou termômetros dentro e fora da cavidade, relacionando os pontos de medição da temperatura do ar, das rochas e, quando o caso, da água, com a distância em relação à boca e a altura em relação ao rio. Em suas conclusões, propôs uma estratificação vertical da caverna, dividida em três camadas: uma de grande variação térmica; uma zona de maior estabilidade relativa; e a zona mais profunda, cujas temperaturas eram mais elevadas (CÉSAR JÚNIOR, 1980).

Por fim, o trabalho de campo realizado por José Roberto de Alencar Moreira e Eleonora Trajano, em 1988, nas cavernas Pedra da Cachoeira, Planaltina e Limoeiro, na região de Altamira, Pará. Trata-se do trabalho com metodologia mais complexa e sistemática desta fase, já demonstrando uma tendência de transição com os trabalhos dos anos de 1990. Os autores fizeram um perfil térmico com psicrômetro, com seis coletas diárias espaçadas em quatro horas entre si. Os dados foram comparados com aferições externas regionais. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar foram analisados em estado bruto e pelo desvio padrão, de forma a possibilitar análises da estabilidade atmosférica à medida que se avança no interior das cavidades pesquisadas. Para uma das cavernas, a Planaltina, os autores também levantam hipóteses sobre a influência de colônias de morcegos e seus respectivos depósitos de guano no aumento da temperatura do ar aferida. Por fim, classificam os ambientes das cavernas em quatro categorias: os salões próximos à entrada, com influência direta do clima externo; as galerias de rio, com umidade próxima à saturação; as galerias secas, com umidade inferior; e as galerias mais ao

fundo das cavernas, com influência das grandes populações de morcegos no aumento da temperatura do ar (MOREIRA; TRAJANO, 1992).

3.6.2. Segunda fase: os monitoramentos pioneiros dos anos 1990

Os anos de 1990 inauguram uma nova fase no estudo atmosférico subterrâneo no Brasil. Embora seja marcado pela pequena quantidade de trabalhos – apenas três pesquisas identificadas –, a sua principal característica é o ganho qualitativo, com o início dos monitoramentos de longo prazo no país.

Esta fase se inicia com o trabalho da geógrafa Sílvia Néri de Carvalho, na gruta Olhos d'Água, em Castro-PR. Entre agosto de 1991 e agosto de 1992, foi desenvolvida uma pesquisa de mestrado, a primeira no país sobre espeleoclima, vinculada ao programa de Geociências e Meio Ambiente da UNESP de Rio Claro. Os estudos foram concentrados na aferição dos seguintes atributos atmosféricos: temperatura e umidade relativa do ar, evaporação e pressão atmosférica, em quatro pontos no interior da cavidade e em outro externo, em seu entorno. O monitoramento foi feito considerando as estações do ano, nas quais foi selecionado um período típico de dez dias para as coletas de dados. Os equipamentos usados foram termohigrógrafos analógicos, evaporígrafo e barógrafo. As conclusões apontaram grande estabilidade higrotérmica na caverna, proporcional a distância da ressurgência, com influências na circulação de ar nos períodos de inverno e verão. As maiores temperaturas foram observadas na primavera, ao passo que as taxas de evaporação foram maiores no verão. A pressão atmosférica, embora pouco variável, é mais elevada no inverno. Ao fim, a autora ressalta a importância do espeleoturismo para a conservação da gruta Olhos d'Água, de forma a evitar a sua depredação pelo uso esporádico desregrado (CARVALHO, 2001).

Entre os anos de 1998 e 1999, uma equipe de pesquisadores belgas, franceses e brasileiros desenvolveu o segundo trabalho marcante deste período. Os maiores feitos metodológicos da equipe foram: a inovação tecnológica, com o uso de registradores automáticos de dados; o monitoramento contínuo; e a realização de estudos simultâneos em cavernas em duas regiões brasileiras: a caverna Paineira, em Goiás e a gruta João Arruda, em Mato Grosso do Sul. Os autores trabalharam com a temperatura do ar, pressão atmosférica e taxas de gotejamentos em estalactites, para fins de estudos paleoclimáticos. Em suas conclusões, ressaltam a

estabilidade climática da cavidade goiana, em oposição à grande amplitude térmica – 13 °C – da caverna sul-mato-grossense (SONDAG et al., 2003).

Ainda no final dos anos 1990, foi iniciado o *Estudo de Impacto Ambiental do Monumento Natural Gruta do Lago Azul* (UFMS, 2002), que engloba a caverna homônima à área protegida e a gruta Nossa Senhora Aparecida.

Os aspectos metodológicos deste trabalho se fazem transparecer pelo rigor no monitoramento espeleoclimático em ambas as cavernas, com o uso de redes compostas por quatro a cinco termohigrômetros adquiridos pelo IPHAN, registrando dados em intervalos regulares de trinta minutos, durante um ano. Parte deste estudo também foi conduzida na forma de uma dissertação de mestrado, de Silva (2003).

Os principais resultados advindos desta contribuição, além do conhecimento da dinâmica atmosférica das cavernas estudadas, foram no campo metodológico. Especial destaque para a confirmação da utilidade da metodologia de capacidade de carga de Cifuentes-Arias (1992) em cavernas cuja variabilidade atmosférica possua alta correlação com o meio externo, como é o caso das cavidades pesquisadas. Para a gruta do Lago Azul, esta correlação é ainda maior, pois reflete diretamente até mesmo na umidade relativa do ar (SILVA, 2003; BOGGIANI et al., 2001, 2007).

3.6.3. Terceira fase: os estudos e monitoramentos contemporâneos

Se até o final do século XX o panorama geral dos estudos espeleoclimáticos brasileiros ainda era restrito, o início do século XXI trouxe novo alento quantitativo e tecnológico para o tema. Sem margem de dúvidas, o grande fator motivador destes estudos foi o aumento da cobrança dos órgãos ambientais estaduais e federais quanto ao adequado manejo de cavernas abertas ao turismo, aliado ao aumento da disponibilidade de tecnologias de monitoramento. Bons exemplos nesse sentido foram feitos nas grutas de Botuverá, em Santa Catarina (RABELO et al., 2003), no período entre dezembro de 1999 e novembro de 2000; e de Ubajara, no Ceará (VERÍSSIMO et al., 2003, 2005), entre outubro de 2002 e junho de 2003.

No primeiro caso, as principais hipóteses levantadas giraram em torno dos impactos do uso turístico no espeleoclima e, por consequência, nos espeleotemas e na fauna. Para tanto, foram instalados quatro instrumentos de monitoramento e registro simultâneo de temperatura e umidade relativa do ar e outro para o registro do tempo de iluminação artificial, dado que a gruta era iluminada com lâmpadas incandescentes e fluorescentes, além de monitoramento de gotejamento em um

espeleotema. Os autores não identificaram relações entre a presença de turistas, ou mesmo da iluminação elétrica utilizada – à exceção da proximidade dos holofotes – com um aumento da temperatura atmosférica na caverna, descartando a hipótese de impactos do turismo no espeleoclima (RABELO et al., 2003).

Para a gruta de Ubajara, no Ceará, o estudo realizado focou na relação entre o espeleoclima e a capacidade de carga turística da caverna. Para tanto, se utilizaram de 14 termohigrômetros com registradores de dados, distribuídos entre a área externa e o interior da cavidade. As principais conclusões apontaram variações nos parâmetros aferidos em função da dinâmica atmosférica externa à caverna (VERÍSSIMO et al., 2003, 2005).

Outros trabalhos visando contribuições ao manejo turístico foram realizados no abismo Anhumas, em Bonito-MS (COSTA JÚNIOR, 2004), na gruta do Chapéu, em Apiaí-SP (SGARBI, 2003), na caverna de Santana, em Iporanga-SP (SGARBI, 2003; SCALEANTE, 2003), na gruta de Maquiné, em Cordisburgo-MG (LIMA; MORAIS, 2006) e na gruta Colorida, em Ribeirão Grande-SP (LONGHITANO et al., 2007; ROCHA et al., 2007); na gruta do Penhasco, em Buritinópolis-GO (LOBO; ZAGO, 2010); na gruta do Morro Preto, em Iporanga-SP (LOBO et al., 2009b); e na lapa de Antônio Pereira, em município homônimo, em MG (TRAVASSOS, 2010). O ponto comum entre estes estudos é a simplificação metodológica nos processos de coleta de dados, se atendo a monitoramentos de curto prazo – variável entre um e sete dias –, perfis higrotérmicos e baixa densidade amostral espacial. O mesmo perfil metodológico se repete nos trabalhos realizados em 28 cavernas do Estado de São Paulo, para elaboração de seus respectivos planos de manejo espeleológico (FUNDAÇÃO FLORESTAL; EKOS BRASIL, 2010). A utilização de amostragens temporal e espacialmente restritas de dados, nem sempre representativas da dinâmica atmosférica subterrânea, é aceitável em função das características exploratórias destes trabalhos. Entretanto, tal prática precisa ser observada com a devida cautela, sobretudo em função dos objetivos dos estudos, centrados na análise dos impactos de visitação, a qual prescinde um conhecimento mais amplo do regime da dinâmica atmosférica habitual de cada caverna (cf. CIGNA, 2002a, b; CALAFORRA et al., 2003, FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006b, entre outros).

Além dos trabalhos especificamente focados em questões de manejo, outros relativos a pesquisas de pós-graduação também vêm sendo produzidos a partir dos anos 2000. O primeiro deles, em ordem cronológica, é de autoria de Oduvaldo Viana

Júnior, que monitorou entre junho de 2000 e setembro de 2001 a temperatura e umidade relativa do ar em dois pontos da já citada caverna de Santana. O objetivo de seu estudo estava centrado na análise da fácies de percolação vadosa autogênica da caverna, utilizando o espeleoclima como dado acessório para as análises efetuadas (VIANA JÚNIOR, 2002).

O segundo é de autoria de Simone Alberigi, que trabalha desde 2003 com o monitoramento de ^{222}Rn nas cavernas Santana, Morro Preto, Couto, Alambari de Baixo, Laje Branca e Água Suja (ALBERIGI, 2006). Em um primeiro momento as pesquisas atenderam ao seu mestrado, e posteriormente, foram focadas no doutorado. Os resultados destas pesquisas demonstram que os níveis de ^{222}Rn no ar das cavernas monitoradas não são alarmantes para a saúde humana, nem mesmo dos condutores de visitantes, que adentram as cavernas com maior frequência. Parte de seus resultados já foi publicada nos trabalhos de Campos et al. (2006) e Alberigi; Pecequilo (2007, 2008).

O terceiro destes trabalhos foi conduzido por Bárbara Nazaré Rocha, em dez cavernas do Parque Estadual Intervales, SP. A autora trabalhou em seu mestrado com a caracterização do espeleoclima e sua relação com a dinâmica climática externa, com base nos dados obtidos para a realização do plano de manejo espeleológico destas cavernas (ROCHA, 2010).

Por fim, a presente pesquisa de doutorado em Geociências e Meio Ambiente, com enfoque na relação entre a dinâmica atmosférica subterrânea e a capacidade de carga espeleoturística.



Capítulo 4

ESPELEOTURISMO E MANEJO DE CAVERNAS

Grupo de turistas em visita à
caverna de Santana, acompanhados
de monitores ambientais locais.

4. ESPELEOTURISMO E MANEJO DE CAVERNAS

4.1. Conservação ambiental, biodiversidade e geoconservação

A conservação da natureza remete ao antigo ideário que separa o ser humano das demais espécies vivas e do meio em que vivem. A base desta concepção deriva do pensamento edênico difundido pelo cristianismo, focado na construção de uma imagem de “paraíso”, onde a paisagem é plana, suave, destituída de variações de relevo, como montanhas, serras, abismos e cavernas (DIEGUES, 2000; THOMAS, 2001).

Durante muitos séculos, a natureza teve sua imagem associada a aspectos negativos, caóticos e sem controle. Essa imagem começou a ser alterada em meados do século XVIII, sob influência do Romantismo. Nesta época, clérigos ingleses difundiram a ideia da natureza como fonte de renovação psíquica, física e espiritual, dada a perfeição da criação divina. As viagens da aristocracia inglesa – com destaque para o *grand tour*, um ritual de iniciação dos jovens homens – para o conhecimento de novas culturas e para o contato com paisagens como o mar, as montanhas e as florestas foram uma nítida expressão dessa nova postura. A expansão da malha ferroviária europeia no período pós-revolução industrial foi outro fator chave para a expansão destas viagens (THOMAS, 2001; MOLINA, 2003; RUSSCHMANN, 2004; REJOWSKI et al., 2005).

Ao encontro deste novo ideário de natureza, em 1872 foi criada a primeira área natural protegida no mundo, o Parque Nacional de Yellowstone, nos Estados Unidos. Suas características se refletem nos moldes da maioria das áreas naturais protegidas do Brasil: a separação do ser humano da natureza e o biocentrismo como eixo norteador de sua implantação e manutenção. Em sua análise da criação das áreas naturais protegidas no mundo, Hosaka (2009) explica que no período entre 1872 e 1940, o enfoque principal dado nas propostas de áreas protegidas estava centrado na preservação de espécies de animais e plantas. No período seguinte, entre 1940 e 1970, este enfoque começou a ser ampliado, incluindo ecossistemas, biomas e elementos do patrimônio arqueológico. Todavia, o salto quantitativo e qualitativo ocorre em 1972, com a realização da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, em Estocolmo, na Suécia. Monteiro (2000) aponta este evento como um marco mundial para o ambientalismo e para a conservação da natureza. Nos anos de 1990, a IUCN apresentou uma classificação padronizada de áreas naturais protegidas, incluindo os monumentos naturais (CEBALLOS-LASCURÁIN, 1996) – atualmente bastante utilizados para a geoconservação.

No Brasil, convencionou-se dizer que a primeira unidade de conservação (UC) criada nestes moldes foi o Parque Nacional de Itatiaia, no Estado do Rio de Janeiro, em 1937 (HOSAKA, 2009). No entanto, outras áreas naturais protegidas foram formalizadas antes dele, como o Horto Botânico de São Paulo – atual Parque Estadual Alberto Löfgren –, criado em 1896, ou a Estação Biológica Alto da Serra, criada em 1901 pelo alemão Hermann Friederich Albrecht von Ihering, e que em 1938 passou a ser administrada pelo Instituto de Botânica, sendo atualmente denominada Reserva Biológica do Alto da Serra de Paranapiacaba.

As UCs brasileiras são regidas por meio da Lei nº. 9.985 de 18 de julho de 2000, o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC). A prática de uso público das UCs para fins turísticos é prevista em lei, desde que as atividades sejam desenvolvidas com os princípios do ecoturismo. No âmbito das políticas públicas no Brasil, este tipo de turismo é definido como

um segmento da atividade turística que utiliza, de forma sustentável, o patrimônio natural e cultural, incentiva sua conservação e busca formação de uma consciência ambientalista através da interpretação do ambiente, promovendo o bem-estar das populações envolvidas (BRASIL, 1994, p. 19).

O ideário presente no discurso de ecoturismo, nesta ou em outras definições, remete predominantemente à concepção edênica de natureza. Pires (2002) analisou

trinta conceitos de ecoturismo publicados em diversos lugares do mundo, em trabalhos acadêmicos, folhetos de mercado, diplomas públicos e organizações não-governamentais. Em sua síntese, esclarece que o ideário geral de ecoturismo possui caráter biocêntrico. Nesta e em outras análises feitas sobre o turismo em áreas naturais (e.g. BRILHA, 2002; MOREIRA, 2009; PEREIRA, 2010), ressalta-se a ausência de menções diretas à geoconservação, com apenas algumas referências a determinados componentes do meio físico, como rios, cachoeiras e praias. Por outro lado, formas naturais como as cavernas e elementos como as rochas, sempre foram ressaltados de forma negativa e hostil (FIGUEIREDO, 1988; TRAVASSOS, 2010).

A atenção a geocnoservação começou a ser difundida no âmbito mundial nos anos noventa do século XX e a ser incorporado na agenda ambiental brasileira a partir do século XXI, com o reconhecimento formal e a ampliação das iniciativas de geoconservação. Em sua essência, carrega traços intrínsecos da relação entre o ser humano e o ambiente, além dos desdobramentos culturais originados nestas relações, como os aspectos arqueológicos, os valores estéticos e a associação imediata de determinadas feições geológicas e geomorfológicas com os lugares que as abrigam (SILVA; PERINOTTO, 2007; NASCIMENTO et al., 2008).

Em linhas gerais, esta nova perspectiva busca conferir peso e importância semelhante entre a geoconservação e a biodiversidade. Este fator é de suma importância para a conservação das paisagens cársticas e cavernas, tendo como pano de fundo “os valores econômicos, científicos e humanos, dentro do contexto cultural e político local” (WATSON et al., 1997, p. 9). A questão dos valores geoconservacionistas em áreas cársticas também foi abordada por Pereira (2010), que apresentou uma tabela com valores intrínsecos, culturais, estéticos, econômicos, funcionais, científicos e educacionais para a Chapada Diamantina, Brasil. Além disso, algumas outras iniciativas têm se mostrado seminais para a geoconservação, tais como:

- A criação de áreas naturais protegidas com enfoque centrado na geoconservação, como é o caso da Área de Proteção Ambiental do Carste de Lagoa Santa, do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, ambas em Minas Gerais; do Monumento Natural Gruta do Lago Azul e da Reserva Particular do Patrimônio Natural Buraco das Araras, no Mato Grosso do Sul; e do Parque Estadual Terra Ronca, em Goiás. Em comum, todos os exemplos citados auxiliam na preservação e uso sustentável de áreas cársticas e cavernas

- A ampliação dos estudos de manejo de cavernas, como os Estudos de Impactos Ambientais das grutas do Lago Azul e Nossa Senhora Aparecida, no Mato Grosso do Sul; e os Planos de Manejo Espeleológico das grutas Rei do Mato, Maquiné – em Minas Gerais – Ubajara – no Ceará – e Santana, Diabo e Colorida – em São Paulo, entre muitos outros exemplos
- As propostas de criação de geoparques, uma forma diferenciada de ordenação territorial que emergiu nos anos noventa do século XX na Europa (SÁ et al., 2006) que não expropria a terra de seu domínio privado, mas que propõe uma revalorização do meio físico, por meio dos geosítios, bem como preconiza o benefício sócio-econômico das populações locais. Exemplos brasileiros são a Chapada do Araripe-CE e a Serra da Bodoquena-MS.

Tais iniciativas se fortalecem e se fazem notar pela crescente expansão de um segmento emergente do mercado turístico, o geoturismo (NASCIMENTO et al., 2007), que pode ser definido como "um novo segmento de turismo em áreas naturais, realizado por pessoas que têm o interesse em conhecer mais os aspectos geológicos e geomorfológicos de um determinado local, sendo esta a sua principal motivação de viagem" (MOREIRA, 2009, p. 1). É também a "visita organizada e orientada a locais onde ocorrem recursos do meio físico geológico que testemunham uma fase do passado ou da história da origem e evolução do planeta Terra" (SILVA; PERINOTTO, 2007, p. 7). Trata-se de uma forma sustentável de turismo (BUCKLEY, 2006; PERINOTTO, 2007; SILVA; PERINOTTO, 2007), objetivando a geoconservação (NASCIMENTO et al., 2007), baseada na experiência do visitante, e não somente na contemplação passiva do ambiente (PERINOTTO, 2007).

Moreira (2009) acrescenta que sua origem está ligada ao ecoturismo, ao turismo de aventura e ao turismo cultural. Algumas de suas vertentes mais conhecidas são o turismo mineral (LICCARDO, 2007) e o turismo geológico (MOREIRA, 2009). Medeiros (2007) apresenta o termo ecogeoturismo, embora não o diferencie substancialmente da essência já apresentada das definições de geoturismo. Lobo et al. (2007) mencionam algumas possibilidades de realização do geoturismo em áreas cársticas, associando o segmento ao espeleoturismo, ao turismo de aventura, religioso e cultural, entre outros. A Figura 4.1 apresenta algumas das potencialidades geoturísticas da paisagem cárstica ou a esta associadas, demonstrando que seu apelo cênico se estende para além do aproveitamento notório que é feito por meio do espeleoturismo.

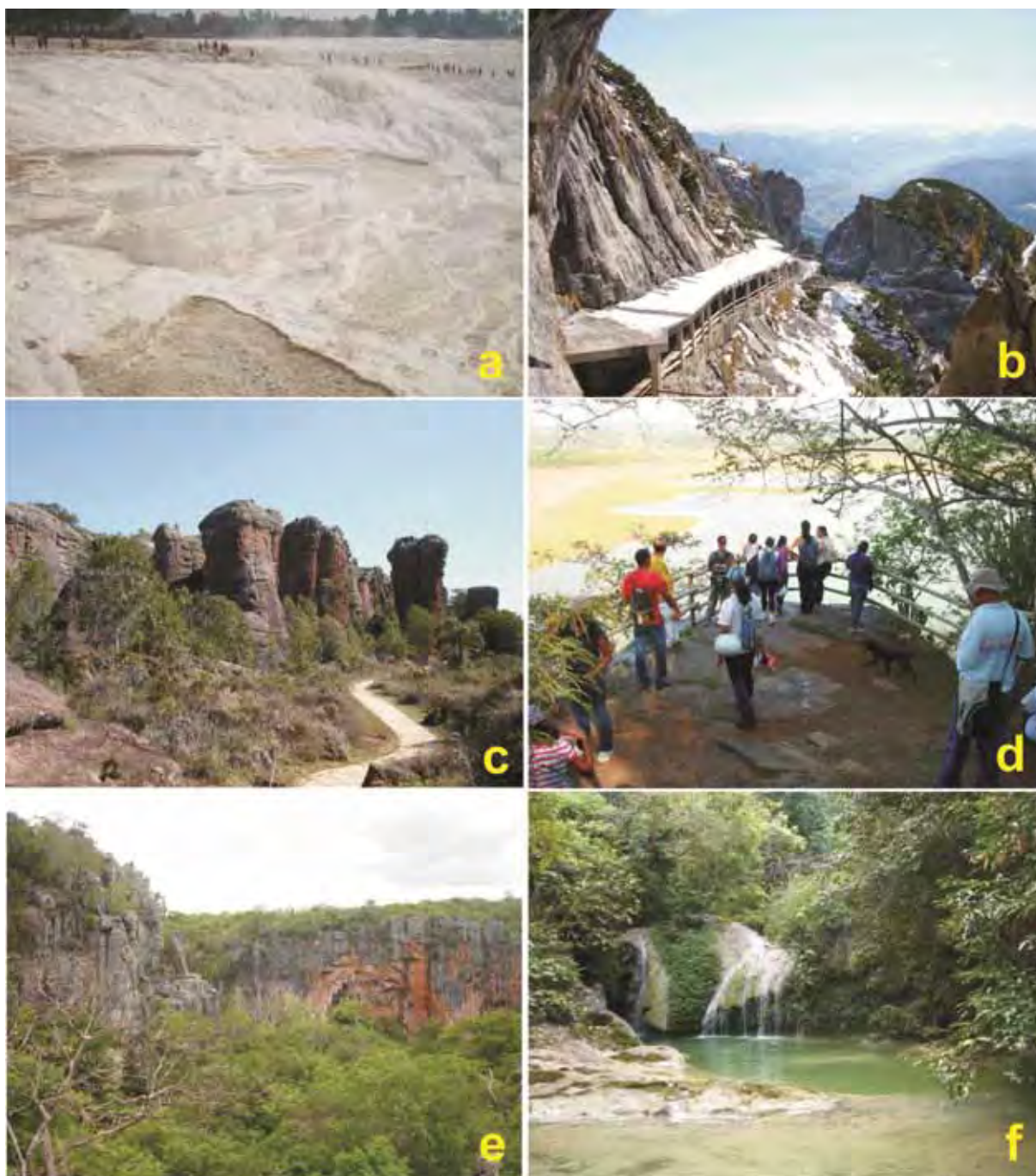


Figura 4.1 – Exemplos que evidenciam o potencial geoturístico das paisagens cársticas. a) Travertinos a céu aberto de Pamukkale, na Turquia, formados por águas termais. O conjunto todo é tombado pela UNESCO, em conjunto com a Hierápolis de Friggia, cidade romana construída no alto da colina onde estão os travertinos; b) Alpes austríacos em rochas carbonáticas na região de Werfen (Salzburg), com trilha de acesso à caverna Eisreisenwelt, uma das mais visitadas do mundo; c) Arenitos ruíniformes do Parque Estadual de Vila Velha, no Paraná, uma região de carste subjacente (SALLUN FILHO; KARMANN, 2007); d) Mirante com vista para a polje do Sumidouro, no Parque Estadual do Sumidouro, em Lagoa Santa, Minas Gerais; e) Um dos mirantes da trilha do Silú, no Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, Minas Gerais. A região figura na lista de postulantes a patrimônio espeleológico mundial da UNESCO (WILLIAMS, 2008); f) Cachoeiras formadas por tufas carbonáticas e águas límpidas no córrego Santa Maria, no Parque Nacional da Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul.

No Brasil, as UCs possibilitam uma associação positiva entre geoconservação e geoturismo. Como exemplo, Nascimento et al. (2008) analisaram os 62 Parques Nacionais brasileiros existentes até 2007. Destes, 42 têm o patrimônio geológico e geomorfológico como principal atrativo. Em sua lista, foram encontrados seis parques onde a paisagem cárstica é o elemento de destaque para a conservação ambiental, conforme apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parques Nacionais cujos principais atrativos são o carste e/ou as cavernas

Unidade de Conservação (Parque Nacional)	Ano de Criação	Estado	Área (Hectares)
Ubajara	1959	CE	6.271,17
Sete Cidades	1961	PI	6.303,54
Serra da Capivara	1979	PI	91.834,08
Chapada Diamantina	1985	BA	151.526,18
Cavernas do Peruaçu	1999	MG	56.448,18
Serra da Bodoquena	2000	MS	77.020,26

Fonte: Adaptado de Nascimento et al. (2008).

Considerando a necessidade da conservação de elementos da natureza, os princípios básicos de uso turístico sustentável das formas naturais – essência do ecoturismo – devem ser priorizados. Para tanto, deve-se levar em conta a ampliação da concepção de natureza, de forma a conferir um enfoque ponderado à biodiversidade e à geoconservação (NASCIMENTO et al., 2007). Ambos devem ser entendidos como norteadores de propostas de conservação, sem deixar de lado a diversidade cultural e a equidade social como princípios básicos: da sustentabilidade (SWARBROOKE, 2002; BUCKLEY, 2006); e da conservação ambiental por meio do turismo (PIRES, 2002; RUSCHMANN, 2004; BUCKLEY, 2006).

Neste contexto, as cavernas podem ser posicionadas como elementos estratégicos para a conservação de parcelas significativas: a) da biodiversidade – considerando principalmente os casos de organismos especializados, como os troglomórficos e troglótenos obrigatórios (TRAJANO; BICHUETTE, 2006); b) da diversidade mineralógica (PULIDO-BOSCH et al., 1997; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006a; FORTI et al., 2007); c) para o conhecimento de climas pretéritos visando a compreensão da dinâmica climática atual e futura (CRUZ JÚNIOR et al., 2005) e espeleoclimática atual (CIGNA, 1967, 2002a); d) e de vestígios arqueológicos (HOYOS et al., 1998; BASTIAN; ALABOUVETTE, 2009).

4.2. Características fundamentais do espeleoturismo

A definição do espeleoturismo parte da identificação dos dois elementos-chave que delimitam qualquer segmento turístico de base psicográfica: a motivação do turista e o fator motivador de viagem. Acerca da motivação do turista, ainda não foram feitos estudos comportamentais amplos, de modo a delimitar o quanto a oportunidade de conhecer cavernas ou vivenciar experiências em seu interior podem influenciar na decisão de se fazer uma viagem. Alguns poucos estudos identificados demonstraram que a possibilidade de conhecer cavernas influencia os turistas que vão à gruta do Lago Azul (LOBO; CUNHA, 2009) e é fator preponderante para os que viajam ao PETAR. Neste último caso, Lobo (2008b) relata que, durante o período em que as cavernas da região estiveram fechadas para o uso público, entre os meses de fevereiro e abril de 2008, a visitação turística no parque e em Iporanga-SP quase cessou. Desta forma, percebe-se a importância das cavernas como fatores motivadores de viagens.

Esta motivação tem sua base fundamentada na modificação do imaginário popular sobre as cavernas, passando a adquirir um caráter muito mais semelhante àquele dado por culturas indígenas (e.g. MINDLIN, 1999; CERVANTES, 2001) e orientais (e.g. PRICE, 2008), permeado pela beleza, curiosidade, misticismo e aventura. A esta nova interpretação, espeleofílica, alia-se a tradicional imagem espeleofóbica, carregada de impressões de perigo e medo (FIGUEIREDO, 1988; FIGUEIREDO et al., 2001; LOBO, 2007; TRAVASSOS et al., 2007, 2008), mas que, por gerar um misto de inquietação e curiosidade, também tem uma faceta atrativa.

De forma geral, até o presente o espeleoturismo tem sido oportunamente compreendido em função de suas outras motivações de visitação – notadamente a contemplação e a aventura. Assim, suas origens epistemológicas podem ser preliminarmente traçadas, tendo por base o ecoturismo enquanto postura e conceito, e o turismo de aventura, o religioso e o geoturismo como modalidades emergentes e correlacionadas. Outros aspectos inerentes ao ambiente cavernícola provavelmente devem aparecer nas entrelinhas de uma proposta conceitual, como a relação espacial – confinamentos, espaços subterrâneos amplos, a existência de um teto, a escala de proximidade obrigatória; e a perda da perspectiva de fotoperíodo, dada à ausência de luz natural, que também causa sensações distintas, muitas delas já arraigadas no imaginário de cada visitante. As nuances de sombras e luzes proporcionadas pelas luzes utilizadas durante a visitação são grandes

influenciadoras e catalisadoras nesse processo. Por fim, a espeleologia, como atividade gênese para o espeleoturismo. É por meio das práticas de espeleologia – técnica (também chamada de espeleísmo por Rasteiro, 2007) ou científica – que muitos se iniciam no meio subterrâneo, tornando-se posteriormente espeleoturistas (e vice-versa). Nesse sentido, Figueiredo (2010) apresenta uma proposta de divisão das atividades humanas em cavernas, exibida na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Divisão hipotética das atividades humanas em cavernas, categorizadas conforme o predomínio das práticas realizadas. Adaptado de Figueiredo (2010)

Apesar da visão aparentemente pragmática apresentada no esquema da Figura 4.2, uma série de depoimentos de espeleólogos de diversos lugares do Brasil permite concluir pela quase impossibilidade de se estabelecer esta divisão na prática, conforme mostram os trabalhos de Rasteiro (2007) e de Figueiredo (2010). É preciso também considerar a dificuldade de se classificar uma pessoa numa única categoria pelo fato de que na maioria dos casos, as pessoas não são de uma categoria, elas apenas momentaneamente estão nesta categoria. Com exemplo, um pesquisador de cavernas que vai a uma caverna turística com sua família ou amigos provavelmente não estará executando uma atividade de pesquisa, fazendo com que, na ocasião em questão, ele deixe de ser *espeleólogo* e passe a ser *espeleoturista*.

Algumas propostas conceituais para o espeleoturismo já foram tentadas, centradas na interpretação literal do termo como turismo em cavernas (VERÍSSIMO et al., 2005; SPOLADORE, 2006). Mas um conceito deste porte e abrangência precisa refletir, além do ato de visitar uma caverna, os pressupostos teóricos e as bases comportamentais desejadas para nortear os planejadores, gestores e

praticantes. Assim, sob a ótica do planejamento e gestão, sugere-se a adoção da definição dada por Lobo (2006a), que apresenta o espeleoturismo como:

Um segmento turístico que busca atingir de forma equilibrada a conservação das cavernas, a conscientização e satisfação das pessoas envolvidas e o desenvolvimento econômico local. Para tanto, deve fazer uso das diversas dimensões presentes no patrimônio espeleológico, aproveitando suas particularidades por meio de propostas de diferenciação mercadológica (LOBO, 2006a, p. 62).

Esta definição pode servir de ponto de partida para construções epistemológicas mais detalhadas, que aliem a visão de pesquisadores da área, operadores de mercado, comunidades locais, espeleólogos e espeleoturistas. Deve-se considerar, por exemplo, não somente a perspectiva de desenvolvimento econômico postulada, mas também as possibilidades de geração de benefícios sócio-econômicos para as comunidades locais, sua fixação na terra e a criação de condições dignas de vida.

Por fim, os métodos de indentificação e análise de potencial espeleoturístico, os quais também contribuem para a delimitação da atividade. Os métodos de Lino (1988) e Lobo (2007) são aplicáveis na análise geral de potencial espeleoturístico, enquanto que o de Nunes et al. (2009) se aplica a análise de potencial para portadores de necessidades especiais – o espeleoturismo adaptado.

4.3. Impactos ambientais do espeleoturismo

A despeito da discussão teórica sobre segmentação do espeleoturismo com base na demanda, é preciso considerar a existência de sua especificidade por conta da oferta: as características intrínsecas dos ambientes subterrâneos, com suas inerentes limitações para o uso antrópico. A identificação e mitigação dos impactos ambientais negativos decorrentes da implantação e execução de atividades espeleoturísticas estão entre as justificativas mais aceitáveis para a existência deste enfoque diferenciado. Assim, a visitação de cavernas não pode ser considerada apenas no âmbito do ecoturismo ou do geoturismo, já que estes segmentos não sintetizam em sua essência os aspectos específicos dos ambientes subterrâneos.

A fragilidade das cavernas, considerada por meio de aspectos morfológicos, geológicos, paleontológicos, espeleoclimáticos, biológicos e arqueológicos, direciona a análise dos impactos de seu uso turístico. De um modo geral, os estudos feitos por Cigna; Burri (2000), Calaforra et al. (2003), Fernández-Cortés et al. (2006a), Ford; Williams (2007) Russell; McLean (2008), Peredo et al. (2009) e Freitas (2010)

ilustram os principais tipos de impactos aos quais as cavernas estão sujeitas em função do espeleoturismo:

- As consequências da iluminação, quer sejam diretas (luz num ambiente afótico), quer indiretas (calor gerado pela lâmpada e pelo sistema)
- O calor liberado pelo corpo humano
- O excesso de dióxido de carbono, disponibilizado no ambiente cavernícola, tanto pela respiração, quanto, em alguns casos, pelo uso de carbureteiras
- A poeira levada para dentro das cavidades, nas roupas, pele e cabelos
- Os impactos físicos, tanto para a instalação de estruturas externas e internas de visita quanto pelo pisoteamento e quebra – ocasional ou intencional – de espeleotemas
- O aumento do fluxo de visita, conseqüente à implantação de facilidades de acesso; e
- As alterações diretas ao ambiente, como a construção de portas, abertura de túneis artificiais, drenagem de lagos e controle artificial do fluxo de água e ar.

Embora trate praticamente dos mesmos impactos, Bella (2010) apresenta-os em uma nova perspectiva, mais dinâmica e geossistêmica. Em seu trabalho, o autor aponta os seguintes impactos do turismo em cavernas:

- Destruição parcial das cavernas, pela remoção da rocha matriz
- Interrupção ou destruição de um dos muitos componentes dos geossistemas cavernícolas, com ou sem interferência em seus mecanismos funcionais menos expressivos (e.g. destruição de espeleotemas; impermeabilização parcial de piso pela construção de benfeitorias de acesso etc)
- Interferência em mecanismos funcionais dos geossistemas cavernícolas:
 - Mudança no padrão dos geossistemas cavernícolas relacionados a mudanças naturais reversíveis, dadas por mecanismos de auto-regulação e seus respectivos estados estacionários (e.g. equalização e compensação de mudanças espeleoclimáticas em consequência da visita; mudanças de condições fóticas perto de fontes de luz elétrica etc), levando-os a outro estado de estabilidade, diferente do original
 - Mudanças na dinâmica sucessional dos geossistemas cavernícolas (e.g. alteração no regime de drenagem e/ou escoamento de água no sistema).

Conferindo maior detalhe às afirmações gerais dos autores inicialmente citados, os estudos de Pulido-Bosch et al. (1997) na caverna Marvels, Espanha, apontam, de um modo geral, um diagrama de efeitos gerados pela presença humana no ambiente subterrâneo (Figura 4.3).

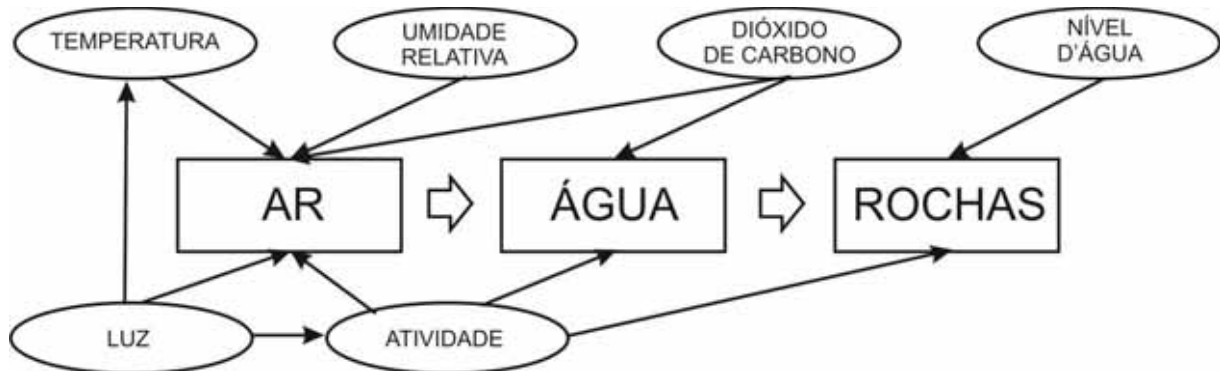


Figura 4.3 – Esquema geral de causa e efeito da visita no ambiente da caverna Marvels, Espanha (PULIDO-BOSCH et al., 1997)

A pesquisa demonstrou que a maior parte das alterações antrópicas ocorre na atmosfera subterrânea, e que isto pode implicar em alterações diretas ou indiretas nos demais elementos. O resultado desta reação em cadeia é a degradação dos cristais de calcita e aragonita, sendo estes os aspectos mais atrativos da caverna pesquisada. Os autores deste trabalho também realizaram análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em 25 amostras de espeleotemas (Figura 4.4).

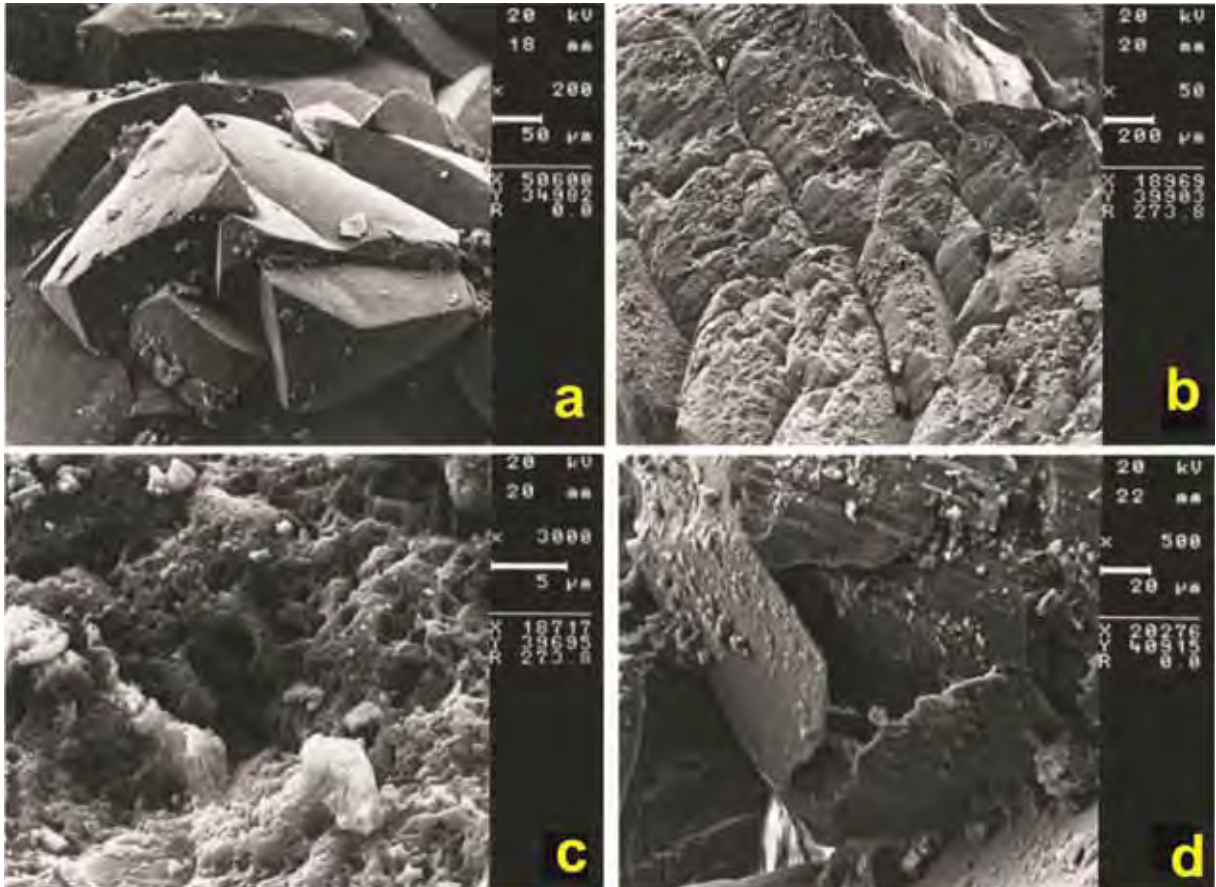


Figura 4.4 – Imagens de MEV de espeleotemas da caverna Marvels, Espanha (PULIDO-BOSCH et al., 2007, p. 147-148)

A Figura 4.4a exibe uma amostra retirada de uma área distante do circuito de visitação, sem traços de dissolução e com apenas algumas evidências de corpos estranhos nas superfícies. As fotos 4.4b e 4.4c são de amostras afetadas pela colonização microbológica decorrente da iluminação artificial, com uma microtopografia diferenciada, com profusão de túneis e sulcos causados por corrosão microbológica. Por fim, a imagem 4.4d exibe o caso mais drástico ilustrado, com níveis elevados de corrosão dos cristais, o que implica em desagregação mecânica dos minerais e alta porosidade, deixando-o mais suscetível à corrosão química.

Nesta mesma escala de análise, também é comum encontrar microorganismos e biofilmes em espeleotemas e rochas em cavernas, como já relatado em diversos trabalhos (e.g. GORBUSHINA, 2007; BASKAR et al., 2009; VAUGHAN et al., 2011), os quais podem ser de origem natural ou antrópica. A título de exemplo, a Figura 4.5 ilustra imagens em MEV de organismos bióticos.

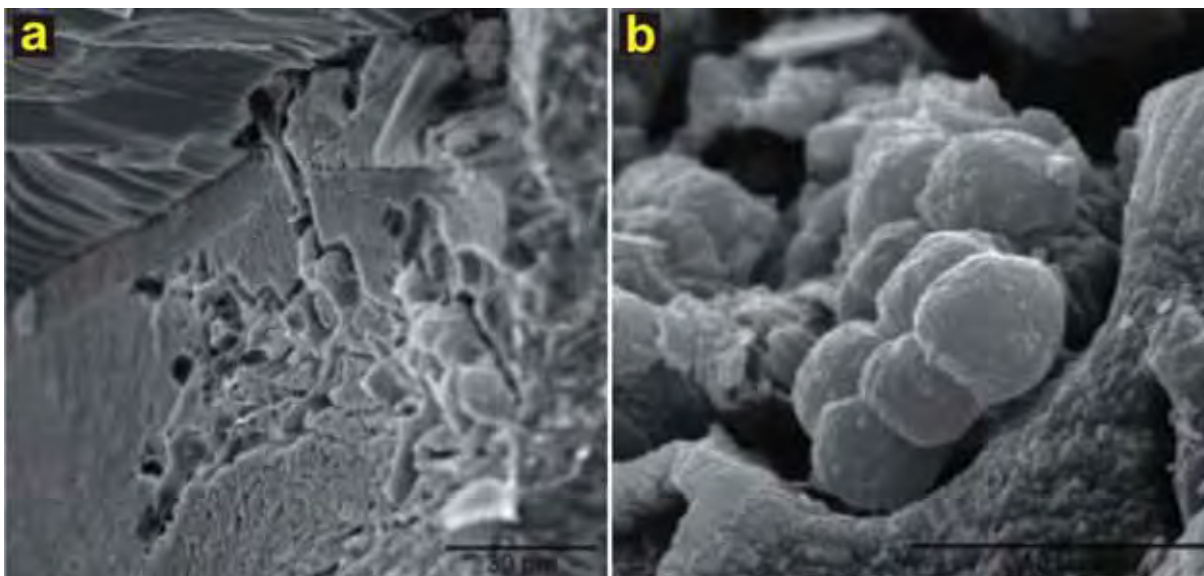


Figura 4.5 – Exemplos de interação orgânica em rochas carbonáticas (GORBUSHINA, 2007).

A Figura 4.5a ilustra um biofilme de fungos em intensa interação com o substrato de um mármore, com as hifas conquistando espaço no espaço intragranular, por meio da secreção de ácidos que os corroem. Na Figura 4.5b, observa-se uma microcolônia de fungos instalada em outro carbonato, em uma microfenda na rocha aberta por processos biológicos (GORBUSHINA, 2007). Muitos desses organismos podem ser levados para dentro das cavernas por seres humanos, em seu corpo ou roupas.

Ainda sobre os problemas em superfícies de espeleotemas, o geodo gigante de Pulpí, na Espanha, com cristais gigantes de gipsita em seu interior, tem como parâmetro crítico da visita a condensação de vapor d'água nos espeleotemas (FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006a). Visitas-piloto em grupos de apenas três pessoas demonstraram que em menos de dez minutos, ocorre a condensação e/ou evaporação de água na superfície dos cristais, ampliando seu risco de corrosão. Além disso, o tempo para que as condições ambientais sejam normalizadas excede um período de 24h, dado o alto grau de confinamento do geodo. Neste caso, os autores recomendaram que a cavidade não seja visitada, seja em função do aporte energético gerado pela presença humana, seja pelo impacto físico do pisoteamento. Este mesmo problema, de acúmulo térmico em um período que excede a variação diuturna, foi observado em outra cavidade de pequeno porte, a cueva del Águila, também na Espanha. Nela, as visitas de grandes quantidades de visitantes aos finais de semana geraram acúmulos térmicos da ordem de 0,1 °C, levando quase

uma semana para se estabelecer em seus níveis habituais de temperatura do ar (DOMÍNGUEZ-VILLAR et al., 2010).

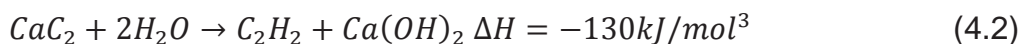
Em outro exemplo de impacto decorrente do espeleoturismo, Villar et al. (1984a, b) identificaram, na caverna Altamira, Espanha, que uma pessoa em movimento dentro de uma cavidade natural produz um montante de energia variável entre 82 W e 160 W. Esta energia, na forma de calor, pode causar alterações sensíveis no espeleoclima, sobretudo em cavernas com menor conectividade com o meio externo. Esta questão é fundamental em cavernas que abrigam pinturas rupestres, em função dos possíveis danos que estas alterações ambientais podem gerar em seus pigmentos, como demonstrado no trabalho de Sánchez-Moral et al. (1999).

Se somente a presença humana já é suficiente para elevar o aporte energético dentro de uma caverna, o uso de iluminação exacerba esta questão. As possibilidades de iluminação de uma caverna podem ser divididas entre as luzes móveis, levadas pelos visitantes e condutores, e as luzes fixas, instaladas na caverna para facilitar a visitação.

Nas luzes móveis, as carbureteiras são os sistemas de ilumina o mais tradicionais, usadas inicialmente por espeleólogos em suas atividades de prospec o, explora o e mapeamento de cavernas – e, conforme Figueiredo (2010), eleitas por alguns como um dos símbolos de suas práticas. As carbureteiras geram uma luz bastante funcional, ampla e intensa, além da vantagem de seu baixo custo. No Brasil, alguns estudos (SCALEANTE, 2003; SGARBI, 2003; LOBO; ZAGO, 2010) demonstraram que as carbureteiras geram impactos no espeleoclima, como o aumento da temperatura e a redu o da umidade relativa do ar. Entretanto, os mesmos estudos demonstram que tais altera es – ainda que substanciais, como observado em Lobo; Zago (2010) – são bastante pontuais, se dissipando em questão de horas.

A chama da carbureteira   originada na combustão do gás acetileno (C₂H₂), que   obtido nas carbureteiras a partir do carbureto de cálcio (CaC₂). O CaC₂   produzido industrialmente em fornos elétricos, que são carregados com misturas de cal e carvão (Equa o 4.1). O cal   obtido pela calcina o de rochas carbonáticas (WILBUR, 2010). A adi o de  gua (H₂O) ao CaC₂ permite a libera o do C₂H₂, que   altamente inflamável (Equa o 4.2).





Os maiores riscos associados ao uso de reatores de carbureto e a produção de luz por acetileno são a combustão acidental, fato este amplamente relatado na literatura espeleológica, gerando acidentes com queimaduras nos usuários. Além disso, segundo o Departamento de Trabalho dos Estados Unidos da América (USDL, 2004) e Foxall (2009), o acetileno é asfixiante, podendo gerar dores de cabeça, enjôos, vômito, perda da capacidade de julgamento e da coordenação motora, fraqueza física e alteração na frequência cardíaca e respiração. Outro aspecto importante é a toxicidade aguda para peixes e invertebrados que um dos subprodutos da reação do CaC_2 possui, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a cal de carbureto de cálcio (WHITE MARTINS, 2006).

A produção do CaC_2 requer fornos com altas temperaturas, perto dos 2000 – 2200 °C. Muitas vezes, traços e pontos de cor escura podem ser vistos em pedaços do produto, o que está ligado a impurezas no CaC_2 , geralmente associadas ao carvão e subprodutos do petróleo utilizados no processo, sendo sua pureza máxima de 80% (WILBUR, 2010). Estas são liberadas junto com o acetileno, sendo os produtos mais comuns a fosfina (PH_3), arsina (AsH_3), amônia (NH_3), amoníaco (NH_4OH) e o sulfeto de hidrogênio (H_2S), os quais lhe conferem o forte odor característico, posto que o acetileno é inodoro quando puro (WHITE MARTINS, s.d.). Em todos os relatos de injúria ou morte decorrentes da exposição ao acetileno, os efeitos adversos foram associados a estas outras substâncias (WILLIAMS; WHITTINGTON, 2001; FOXALL, 2009). Além disso, a queima do C_2H_2 em associação com o oxigênio (O_2) gera fuligem, cujas partículas são normalmente esféricas, compactas, com 60-150 nm, em uma estrutura de rede semelhante a um aerogel (MARQUES, 2000; BERTRAN et al., 2002).

Uma alternativa de iluminação, que pode ser usada tanto na forma móvel quanto na fixa, é o uso da tecnologia de LEDs como fonte de luz. A maioria dos trabalhos recentes (FORD; WILLIAMS, 2007; CIGNA, 2010; NOVOMESKY, 2009, 2010) tem apontado o LED¹ como a fonte de luz mais adequada para uso em cavernas. Porém, como toda fonte de luz, o LED também causa problemas ao ambiente subterrâneo, principalmente se usado de forma incorreta.

¹ *Light-Emitting Diode*, a luz emitida por diodos, em tradução literal do autor.

Na iluminação de cavernas com LEDs – bem como com outras fontes de luz fixas – o que deve ser evitado é a permanência do sistema aceso por longo tempo. As luzes acesas de forma ininterrupta ampliam os impactos de forma substancial, favorecendo a proliferação de *lampentflora* e aquecendo demasiadamente o ambiente (no caso de outros tipos de fontes de luz, que não os LEDs).

Ford; Williams (2007), Toomey III et al. (2009) e Cigna (2010) alertam também para a questão do espectro de emissão de luz a partir da fonte, o que possui relação com sua cor. Os autores explicam que as faixas de espectro que giram entre 440 nm e 650 nm são as menos adequadas para uso em cavernas, por serem favoráveis a absorção da clorofila. Tais faixas correspondem aos tons de cores próximos ao índigo, azul (440 nm) e vermelho (650 nm). Novomeski (2009) acrescenta que a questão estética também deve ser levada em conta ao não se usar estas e outras cores fortes na iluminação de cavernas, por distorcer suas características originais de forma e volume nos visitantes. Por fim, Novomeski (2010) também pontua sobre a temperatura de cor, dando preferência ao uso de LEDs em tons próximos ao branco e com eficiência luminosa acima de 50 lm/W.

Também no Brasil, diversas pesquisas versam sobre os impactos da visitação em cavernas. Os trabalhos de Boggiani et al. (2001, 2007) tiveram por objetivo a realização do Estudo de Impacto Ambiental – Relatório de Impacto Ambiental (EIA-RIMA) do Monumento Natural gruta do Lago Azul, em Bonito-MS. Além do espeleoclima, enfocaram nos impactos causados pela implantação das estruturas de receptivo no exterior da caverna. Também propuseram a sua capacidade de carga, em estudo pioneiro da aplicação do método de Cifuentes-Arias (1992) para cavernas. Por fim, consolidaram a necessidade de implantação definitiva do caminhamento circular na caverna, originalmente proposto em Lino et al. (1984) e detalhado nos estudos de Labegalini (1996). Atualmente, os turistas sobem e descem pelo mesmo trajeto (Figura 4.6), o que conforme Lobo (2006a), amplia os riscos e o desconforto dos visitantes, além de expor o ambiente a uma possibilidade maior de impactos.



Figura 4.6 – Planta baixa ilustrando o caminhamento atual e proposto para a gruta do Lago Azul.
Adaptado de UFMS (2002)

Lima; Morais (2006) também fizeram seu trabalho com o objetivo de apoiar o plano de manejo da cavidade pesquisada, a gruta de Maquiné, em Cordisburgo-MG. Estes autores elaboraram uma análise dos impactos da visitação na caverna (Quadro 4.1), bem como propuseram medidas mitigadoras para contorná-los.

Quadro 4.1 – Síntese da avalia o dos impactos ambientais na gruta do Maquiné

A�o impactante	Impactos (diretos/indiretos)
Coloca�o de cartazes, folders, <i>banners</i> , fotos, mapas e placas indicativas.	Polui�o visual; sensa�o de cansa�o visual.
Atividade tur�stica mal orientada.	Depreda�o do ambiente, por meio de picha�es, quebra e pisoteio de espeleotemas e dispers�o de lixo na cavidade.
Instala�o de infra-estrutura para visita�o interna.	Destrui�o de espeleotemas e fei�es raras.
Instala�o de ilumina�o artificial.	Influ�ncia no espeleoclima; prolifera�o de microorganismos clorofilados; escurecimento de rochas pelo calor intenso.
Coloca�o de grades para impedir a entrada de fauna.	Extin�o de parte da fauna da cavidade.
Grande n�mero de pessoas nos grupos de visita�o.	Depreda�o de espeleotemas; influ�ncia no espeleoclima.
Coloca�o artificial de �gua em travertinos.	Influ�ncia na umidade relativa do ar; impacto visual de mangueiras expostas.

Fonte: Resumido de Lima; Morais (2006).

A pesquisa de Scaleante (2003) na caverna de Santana, em Iporanga-SP, focou nos impactos decorrentes do uso de carbureteiras no espeleoclima. Adotando uma metodologia simplificada, com coletas pontuais de dados de temperatura e umidade relativa do ar, o autor obteve resultados que influenciaram na geração de políticas públicas de conservação, como a proibição do uso de carbureteiras na visitação turística nas cavernas do Estado de São Paulo e o alerta para esta questão no território nacional. Em estudo com o mesmo objetivo, Lobo; Zago (2010) conduziram um experimento de visitação com carbureteiras na gruna do Penhasco, em Buritinópolis-GO (Figura 4.7).

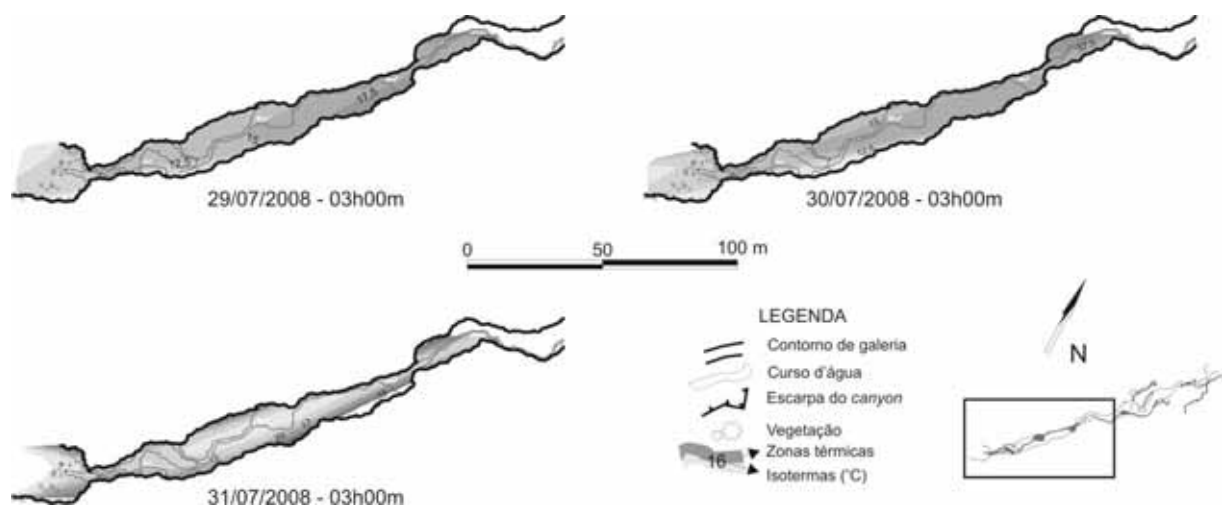


Figura 4.7 – Superfícies de tendência para três episódios temporais na gruna do Penhasco, com os impactos no aumento das temperaturas nos dias 30 e 30.07.2008 (LOBO; ZAGO, 2010)

Os resultados demonstraram um elevado impacto térmico, o que se observa na completa alteração do padrão de tendência térmica no perfil do dia 31 de julho. O aquecimento do ar chegou aos 41,6 °C, com acréscimo térmico de mais de 21 °C e suplantando até mesmo a máxima de temperatura do ar fora da cavidade.

Ainda sobre o espeleoclima, mas com um enfoque diferenciado, Lobo et al. (2009b) realizaram um estudo exploratório durante a realização de um evento cultural musical na gruta do Morro Preto, em Iporanga-SP. Na ocasião, os autores encontraram algumas evidências de impactos, apresentadas na forma de um diagrama de nexos causais (Figura 4.8).

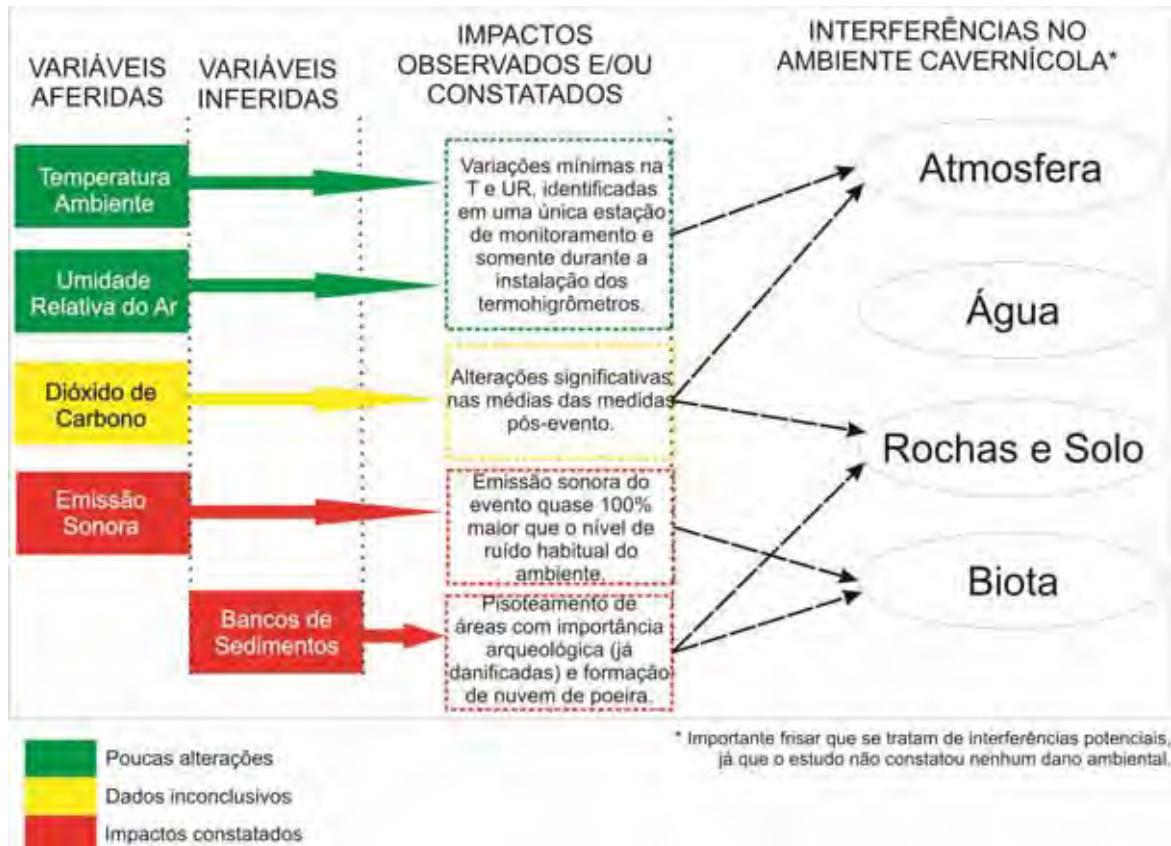


Figura 4.8 – Diagrama de impactos ambientais de eventos culturais na gruta do Morro Preto e hipóteses denexo causal de interferências no ambiente cavernícola (LOBO; ZAGO, 2009)

Os resultados deste trabalho também subsidiaram a elaboração do plano de manejo da caverna (FUNDAÇÃO FLORESTAL; EKOS BRASIL, 2010), que prevê a realização de eventos ecumênicos e religiosos de baixo impacto no ambiente.

Com enfoque nos impactos da iluminação artificial, Labegalini (2007) realizou um estudo na caverna do Diabo, em Eldorado-SP, para propor um novo sistema de iluminação para a cavidade. O sistema anterior, composto por luzes incandescentes e de vapor de mercúrio, além de gerar muito calor, permanecia continuamente aceso, acarretando no desenvolvimento da *lampenflora* nas adjacências dos pontos de luz (Figura 4.10b). A *lampenflora* é inapropriada no ambiente cavernícola, sob o ponto de vista estético e por causar danos no substrato colonizado (MULEC; KOZI, 2009). Na nova proposta, elaborada pelo mesmo autor e também incorporada ao Plano de Manejo Espeleológico da caverna (FUNDAÇÃO FLORESTAL; EKOS BRASIL, 2010), a iluminação será feita com LEDs, e temporizada em função da presença de visitantes, evitando que permaneça continuamente acesa. Variações deste tipo de sistema de controle são utilizadas em diversas cavernas do mundo e mesmo no Brasil, algumas apresentadas nas Figuras 4.9 (c, d) e 4.10 (c, d, e, f).

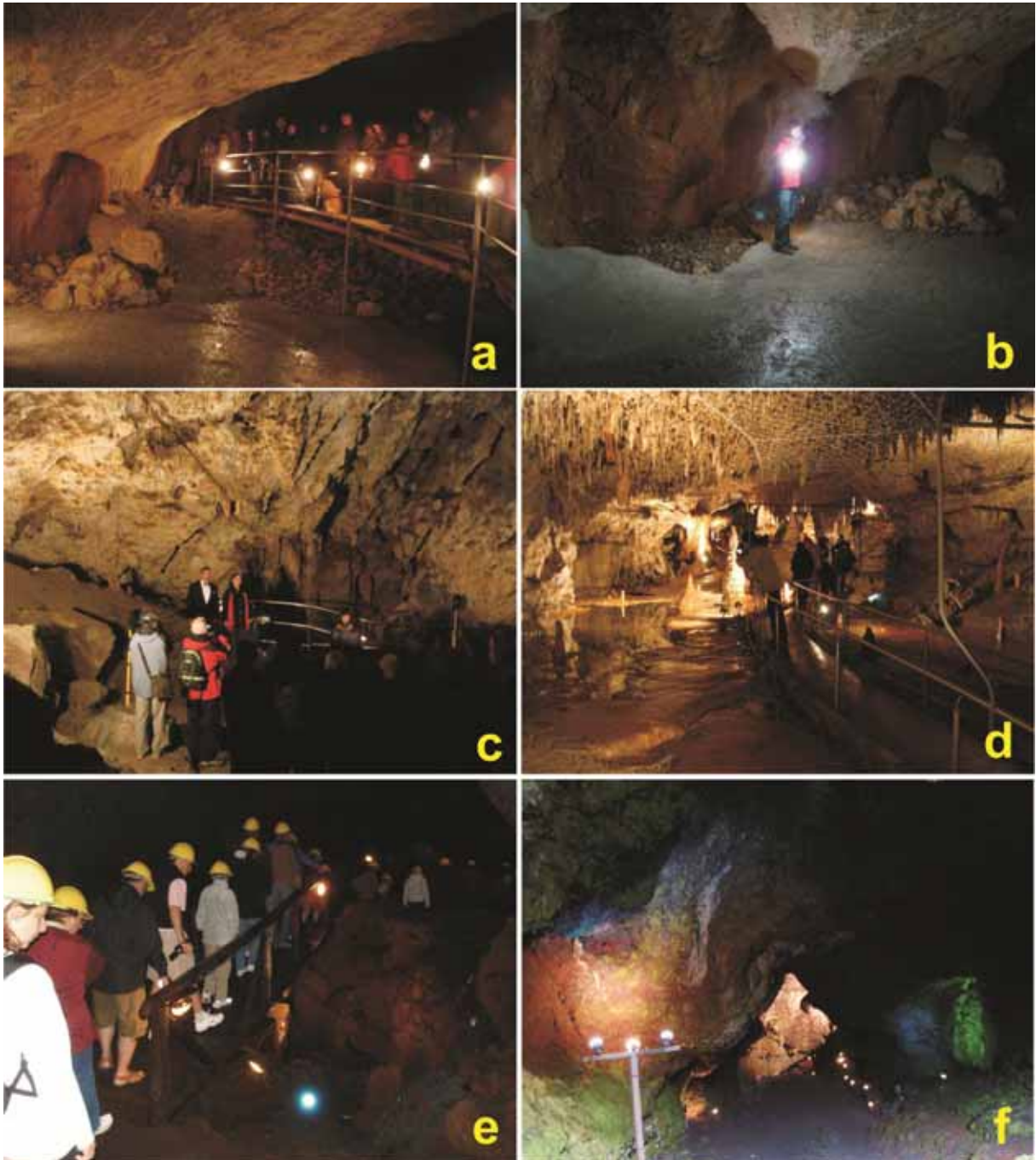


Figura 4.9 – Exemplos de cavernas turísticas com estrutura de visitação no exterior: *Eisreisenwelt*, em Werfen, na Áustria, uma das poucas cavernas turísticas do mundo com gelo perene em seu interior. Além das benfeitorias de acesso, uma de suas características é o uso de carbureteiras de mão durante a visitação, por alguns dos turistas (a), além de iluminação química a base de magnésio, utilizada pelos guias para suas explicações (b); *Demanovska Cave of Liberty*, nas montanhas Tatra, em Liptovsky Mikulas, na Eslováquia, onde são feitas apresentações musicais com cantores líricos acompanhados de um maestro tecladista, em eventos especiais (c). Na mesma caverna, além das benfeitorias de visitação, como passarelas, guarda-corpos e corrimãos, destaque para a estrutura em tela de arame galvanizado para a proteção dos espeleotemas no teto (d); Cueva Villarica, Pucón-Chile, com estruturas rústicas em madeira (e) e profusão de luzes coloridas em seu interior (f).

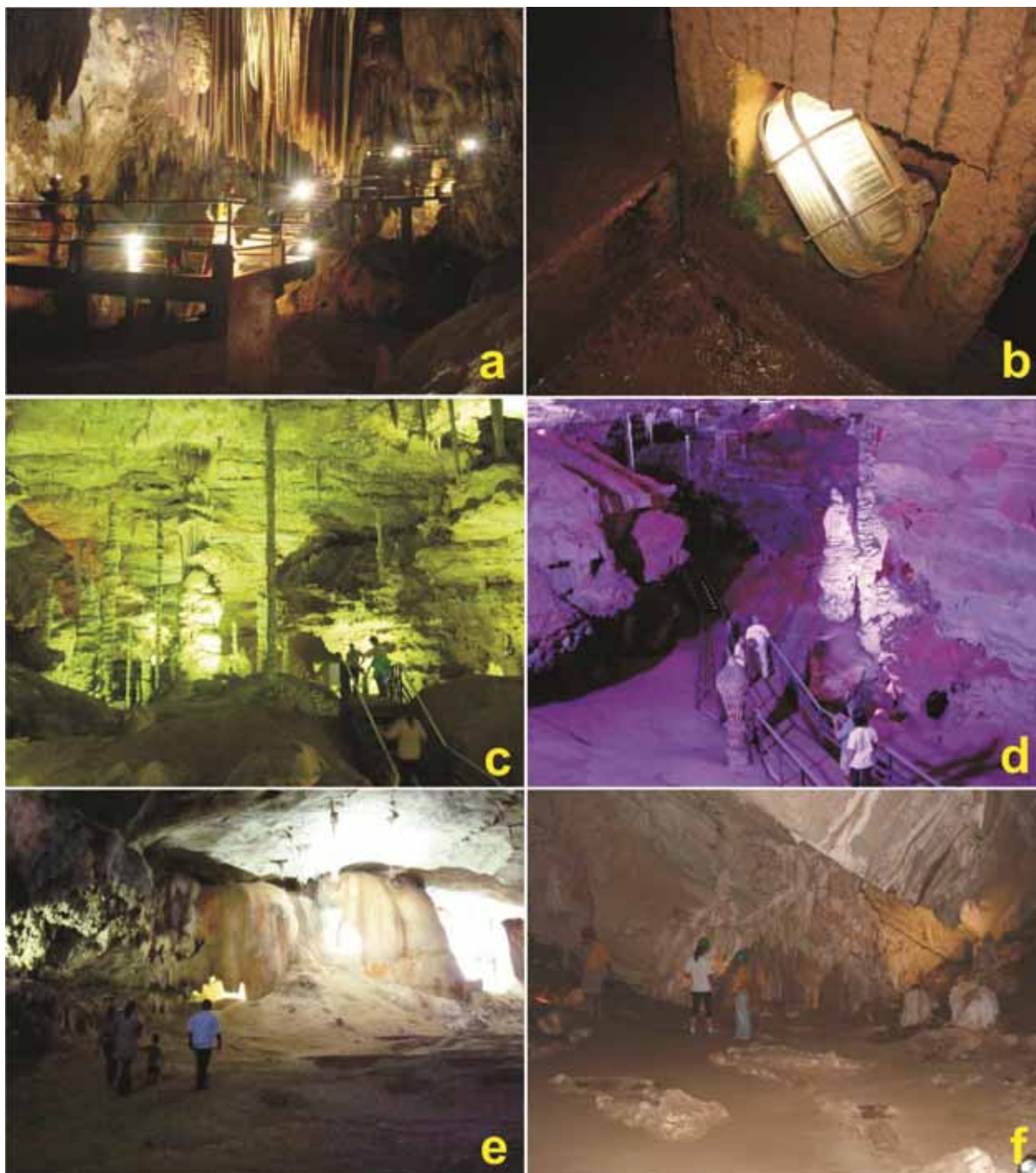


Figura 4.10 – Exemplos de cavernas turísticas com estrutura de visitação no Brasil: Caverna do Diabo, Eldorado-SP, com benfeitorias em concreto (a) e iluminação de caminhada (b), enquanto seu novo projeto elétrico não é implantado; Gruta Rei do Mato, Sete Lagoas-MG, em duas fases de sua iluminação, a antiga (c) e o novo sistema (d), que embora use lâmpadas de LED, estrapola nos tons coloridos, artificializando demasiadamente o ambiente; Gruta de Maquiné, Cordisburgo-MG, já com seu novo sistema de iluminação em LED, com cores mais neutras, permitindo a visualização da caverna em suas nuanças de cores naturais; Gruta de São Miguel, Bonito-MS, com lâmpadas fluorescentes, que apresentam algumas desvantagens (riscos de impactos por gases e maior calor) do que os LEDs.

Além da caverna do Diabo (Figura 4.10a, b), as fotos ilustram outros exemplos de cavernas com infra-estrutura para o espeleoturismo. Com isso, ampliam-se os impactos pontuais do espeleoturismo, em função das alterações

irreversíveis geradas pelas obras estruturais (CIGNA; BURRI, 2000; MARRA, 2001; LOBO, 2006b). Por outro lado, a existência de infra-estrutura dentro das cavernas também evita a extensão de alguns impactos da visita, ao delimitar de forma objetiva os lugares que podem ser acessados dentro de uma caverna, como observado nas Figuras 4.9 (a, d, e) e 4.10 (a, c, d, f).

Por fim, os estudos de Rehme (2008) no conjunto de cavernas Jesuítas-Fadas, em Cerro Azul-PR. De um modo geral, o autor estabeleceu uma linha cronológica entre os anos de 1967 e 2008 e, com base em percepção visual, apontou os principais impactos no meio físico decorrentes das diferentes fases de visita da gruta dos Jesuítas. Em seus resultados, estabeleceu uma relação entre a presença de diferentes tipos de espeleotemas e as zonas de uso propostas no Plano de Manejo da cavidade. Com isso, inferiu a qualidade geral de seu estado de conservação, classificando-a como ótima, pela presença de espeleotemas pouco danificados em todo seu desenvolvimento.

Considerando os diversos exemplos citados, é possível resumir que, qualquer que seja a escala de intensidade utilizada para a visita, sempre existirão impactos ao ambiente. Estas alterações precisam ser conhecidas, de modo que possam ser analisadas e ponderadas para cada caso, em função de aspectos como: o nível de fragilidade do ambiente; as possibilidades de uso; a importância socioeconômica da caverna no contexto onde se insere.

Ainda assim a identificação dos impactos da visita no ambiente subterrâneo é uma estratégia eficiente de diagnóstico e proposição de medidas mitigadoras, sendo esta a base para os atuais processos de manejo espeleológico. Estes buscam resguardar a preservação das cavernas e propiciar a visita ordenada, como será mais bem detalhado na próxima seção.

4.4. Manejo espeleoturístico: princípios e práticas

O manejo de cavernas para fins turísticos no mundo todo se concentra em dois aspectos prioritários: a identificação de variáveis ambientais onde se possa estudar uma relação de causa e efeito entre a sua variação e a presença humana; e seus respectivos parâmetros aceitáveis de alteração. Watson et al. (1997) enfatizam sobre a necessidade de se conciliar o interesse das pessoas em conhecer cavernas e áreas cársticas com as limitações necessárias para as práticas de uso público, delimitadas por meio da vulnerabilidade destes ambientes.

Todavia, a identificação da vulnerabilidade de um ambiente implica na adoção de uma escala menos relativa, a partir de uma recente construção conceitual com origem nas ciências biológicas (MERTZ et al., 2009). No início do Século XXI, o termo ganhou larga difusão em função das discussões sobre mudanças climáticas. De um modo geral, a vulnerabilidade se refere ao risco de degradação do ambiente por causas naturais, em função das inter-relações entre clima, vegetação, relevo, geologia e outras variáveis ambientais (COSTA et al., 2007; FIGUEIREDO et al., 2007). Por outro lado, Mertz et al. (2009) reacendem discussões sobre a necessidade de identificar um marco lógico para a vulnerabilidade, deixando de lado o absolutismo e adotando, necessariamente, uma escala relativa de análise.

Esta escala de vulnerabilidade relativa remete ao conceito de fragilidade do ambiente, em uma perspectiva de equilíbrio dinâmico da paisagem (WATSON; LOVELOCK, 1983; ROSS, 1994), em função das trocas naturais de energia e massa que ocorrem no sistema (HEATON, 1986; CIGNA, 1993; ROSS, 1994). Assim, o nível tolerável de fragilidade se refere ao grau máximo de perturbação antrópica ao ambiente sem que sua capacidade de resiliência seja superada (MANGIN et al., 1999; TRAJANO, 2010).

Dentre os parâmetros consagrados para o manejo de cavernas, destacam-se as variáveis atmosféricas, pela sua facilidade de mensuração, análise e correlação com a presença humana. De uma forma geral, Cigna (2002a, b) aponta a necessidade de monitoramento da temperatura – do ar, das águas, das rochas – da umidade relativa do ar, das taxas de CO₂ no ambiente, dos níveis de ²²²Rn e outros gases se necessário e dos padrões de circulação de água e ar. Além destes parâmetros atmosféricos, outros estudos indicam a importância dos estudos da fauna, dos vestígios de ocupação pretérita, dos depósitos químicos e clásticos e da hidrologia, entre outros aspectos focados na segurança dos turistas. A síntese destas perspectivas pode ser vista no trabalho de Cigna; Forti (1988), cuja estrutura de manejo é apresentada na Figura 4.11.



Figura 4.11 – Modelo conceitual para o manejo de cavernas (CIGNA; FORTI, 1988)

O modelo de Cigna; Forti (1988) apresenta uma estrutura baseada nos estudos de diagnóstico preliminar, com ênfase nos atributos espeleoclimáticos e na concentração de CO_2 . Com estes elementos, apontam para os limites de visitação – a capacidade de carga –, a partir da qual são definidas as características de implantação do espeleoturismo – iluminação, público-alvo, formas de acesso –, manejo e conservação, plano de desenvolvimento mercadológico e normas para a gestão. Em estudo posterior, Cigna; Burri (2000) acrescentam a importância de se utilizar de parâmetros ambientais, sociais e econômicos para prever cenários futuros de visitação, acrescentando que estes estudos são ainda pouco utilizados no planejamento turístico, de um modo geral.

No Brasil, as primeiras diretrizes para o manejo turístico de cavernas são dadas pelos trabalhos de Lino (1988) e Lino et al. (1994). Na sequência, o trabalho de Marra (2001) apresenta um primeiro nível de síntese sobre o tema, o qual resulta na elaboração do *Termo de Referência para Elaboração de Plano de Manejo Espeleológico*, editado pelo CECAV². Este vem sendo alterado desde sua publicação, a partir de algumas experiências de manejo de cavernas no Brasil, como é o caso do *Estudo de Impactos Ambientais do Monumento Natural Gruta do Lago Azul*, em Bonito-MS (UFMS, 2002; BOGGIANI et al., 2007) ou dos planos de manejo espeleológico para 32 cavernas no vale do Ribeira, realizados entre os anos de 2008 e 2010 (FUNDAÇÃO FLORESTAL; EKOS BRASIL, 2010), entre outras.

De um modo geral, estes procedimentos técnicos de manejo espeleológico se perpetuam a partir de estudos de diagnóstico temático do ambiente cavernícola. A simplicidade metodológica e a limitação temporal têm marcado este tipo de estudo, ao menos no Brasil. Os resultados obtidos têm sido utilizados para a obtenção de dois procedimentos técnicos distintos: o manejo do espaço subterrâneo e a capacidade de carga turística.

4.4.1. Manejo do espaço subterrâneo

Duas categorias distintas de manejo do espaço subterrâneo podem ser distinguidas na literatura técnico-científica publicada sobre o tema. A primeira delas, o zoneamento do ambiente, se baseia na equiparação do espaço subterrâneo às unidades de conservação da natureza. A segunda é a delimitação do espaço disponível ao caminhamento, confinando o visitante a uma parcela específica e previamente estabelecida do espaço subterrâneo.

4.4.1.1. Zoneamento ambiental espeleológico

Diversos estudos acadêmicos e diplomas de política pública apresentam definições para o zoneamento ambiental espeleológico (ZAE). Na compreensão de Marra (2001), trata-se de uma ferramenta que

busca estabelecer a demarcação de áreas que, dividindo o seu interior, serão definidas em zonas específicas, visando identificar as categorias de uso em cada um destes setores. [...] representa um recurso aplicado para se alcançar o objetivo do manejo, de forma que facilite o gerenciamento de

² Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, originalmente um órgão do IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), transferido ao ICMBio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade) quando de sua criação, em 2007.

atividades possíveis em cada zona, orientando as intervenções e as formas de uso nas áreas delimitadas, ou mesmo evitando atividades indesejáveis pela inexistência de zonas apropriadas, ou então não permitindo aquelas outras prejudiciais que pudessem colocar em risco a segurança de usuários e do ambiente cavernícola (MARRA, 2001, p. 136).

Para Piva (2006, p. 26-27), o ZAE “indicará no mínimo os salões abertos à visitação, os diferentes usos de cada ambiente, as restrições inerentes a cada caverna, indicação de pontos críticos e atrativos”. Sgarbi acrescenta que “o zoneamento demonstra em termos gerais se a caverna é viável ou inviável ao contato da atividade turística” (SGARBI, 2003, p. 21).

Gillieson (1996) defende que o ZAE é uma ferramenta necessária apenas para cavernas grandes e/ou complexas. Como exemplo, o autor cita a metodologia aplicada no zoneamento da caverna Mammoth, nos EUA, que considera sete níveis distintos de restrição: desde áreas fechadas apenas para estudos científicos ou por razões de segurança, até zonas de uso intensivo, com infra-estrutura de acesso.

Nas políticas públicas, a *Resolução CONAMA 347/2004* define, para efeitos de sua própria compreensão, que o zoneamento espeleológico é a “definição de setores ou zonas em uma cavidade natural subterrânea, com objetivos de manejo e normas específicos, com o propósito de proporcionar os meios e as condições para que todos os objetivos do manejo sejam atingidos” (CONAMA, 2004, s.p.). Por fim, o CECAV, além de concordar com a definição do CONAMA, acrescenta ainda que

o zoneamento constitui um instrumento de ordenamento territorial, usado como recurso para se atingir melhores resultados em planos de manejo de cavidades naturais subterrâneas. Estabelece usos diferenciados para cada zona, segundo os objetivos a serem atingidos (CECAV, 2006, p. 8).

Em síntese, guardando-se as variações entre uma e outra, compreende-se que as definições apontam para situações que permitam: a) o fracionamento lógico do espaço subterrâneo; b) o uso de características intrínsecas ao ambiente para a classificação das frações obtidas; c) o uso público racional, com diretrizes para a implantação de benfeitorias e diretrizes para a gestão; e d) a obtenção de melhores resultados na elaboração de planos de manejo espeleológico.

Em uma proposta metodológica recente, Lobo (2009) partiu das zonas de manejo para Unidades de Conservação, apresentadas no documento *Roteiro Metodológico de Planejamento: Parque Nacional, Reserva Biológica, Estação Ecológica*, editado pelo IBAMA (2002). Ao analisar as categorias de zonas propostas, e a partir dos trabalhos de Sgarbi (2003) e Piva (2006), o autor criou zonas específicas para o manejo espeleológico, apresentadas no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Zonas para o ZAE

ZONA E COR DA LEGENDA	DESCRIÇÃO GERAL
Intangível (ZI)	Área preservada, sem quaisquer tolerâncias a alterações humanas perceptíveis. Representa o mais alto grau de preservação para a caverna em questão. Trata-se de uma zona dedicada à proteção integral dos sistemas subterrâneos, ao monitoramento ambiental e à pesquisa técnico-científica.
Uso Restrito (ZUr-A/B)	Área preservada, com pequena ou mínima intervenção humana, contendo elementos ou processos significativos dos sistemas subterrâneos. O objetivo de manejo é permitir a pesquisa técnico-científica e o uso em escala restrita para determinados tipos de roteiros. Nestes casos, o caminhamento é previamente delimitado.
ZUr-A: sem visitação turística restrita	
ZUr-B: com visitação turística restrita	
Histórico-Cultural (ZHC)	Áreas onde são encontradas amostras do patrimônio histórico/cultural, arqueológico ou paleontológico, servindo à pesquisa, educação e uso científico. O objetivo geral do manejo é o de proteger tradições histórico-culturais, bem como sítios históricos, culturais, paleontológicos ou arqueológicos.
Recuperação (ZR)	Áreas danificadas pelo uso humano e passíveis de recuperação, tanto por processos naturais quanto induzidos. Zona provisória, uma vez restaurada será reclassificada. O objetivo geral de manejo é deter a degradação dos recursos ou restaurar a área. Permite uso público em escala restrita, para fins de pesquisa técnico-científica ou estudo do meio. Watson et al. (1997) recomendam que, sempre que possível, deve-se priorizar a recuperação de uma caverna – na íntegra ou em parte – em detrimento de abrir uma nova caverna ao turismo.
Interferência Experimental (ZIE)	Áreas delimitadas para o desenvolvimento de pesquisas e implantação de laboratórios subterrâneos. O seu objetivo é o desenvolvimento de pesquisas comparativas em áreas preservadas, bem como o estudo do meio e as aulas de campo.
Uso Extensivo (ZUe)	Áreas de caminhamento e pontos interpretativos de dispersão controlada onde o ambiente é mantido o mais próximo possível do natural, contendo algumas facilidades de acesso construídas com materiais inertes e benfeitorias que resguardem a segurança do ambiente e dos visitantes. Em alguns casos, o uso de banheiros químicos deve ser considerado. O objetivo geral de manejo é facilitar o espeleoturismo em pequena, média ou larga escala, dependendo do tipo e da proposta de uso.
Uso Intensivo (ZUi)	Áreas de caminhamento e pontos interpretativos de dispersão controlada onde o ambiente é mantido o mais próximo possível do natural, podendo conter: benfeitorias de acesso construídas com materiais inertes, iluminação artificial e outras facilidades, como banheiros químicos. O objetivo do manejo é possibilitar o espeleoturismo em larga escala.
Área de Influência (AdI)	O entorno imediato e a área correspondente em superfície de uma caverna – em um raio mínimo de 250m –, bem como sua área de recarga autogênica e alogênica. Trata-se de uma área onde as atividades humanas estão sujeitas a normas e restrições específicas, com o propósito de minimizar os impactos negativos sobre os sistemas subterrâneos. Estes limites mínimos são definidos a partir da <i>Resolução CONAMA 347/2004</i> .

Fonte: Lobo (2009), com base em Brasil (2000), IBAMA (2002), Sgarbi (2003) e CONAMA (2004).

Considerando a concentração dos impactos da visitação e a própria dinâmica do ambiente subterrâneo, o ZAE apresenta uma contribuição direta bastante restrita à conservação das cavernas. Embora a limitação espacial da visitação seja necessária, resguardando trechos expressivos do ambiente subterrâneo da pressão constante do uso turístico, a sua classificação em distintas zonas de manejo (p.e. primitiva, de uso restrito sem visitação) se torna de pouca utilidade prática. Isto porque as características que distinguem as zonas de manejo – quer em Lobo (2009), quer em propostas anteriores – são baseadas em métodos simplificados de diagnóstico e sem relação direta com o nexos causal em função da visitação.

Por outro lado, a delimitação da área de influência da caverna, incluindo todo o sistema no qual ela se insere – em uma perspectiva hidrogeológica – é fundamental para sua conservação. Esta deve ser balizada, no mínimo, em função dos seguintes aspectos:

- Projeção em superfície da área total em que a caverna se desenvolve em subsuperfície
- Zonas de recarga dos aquíferos cársticos, intermitentes ou perenes, sejam elas autogênicas, alogênicas, hipogênicas ou de origens mistas
- Uma zona de amortecimento em seu entorno, especialmente delimitada em função das particularidades de cada caso, para proteger o corpo rochoso onde a cavidade está inserida.

4.4.1.2. Delimitação do caminhamento de visitação

Contrapondo a lógica processual e espacial do zoneamento ambiental espeleológico – que estabelece categorias de restrição de uso ao ambiente a partir de áreas relativamente mais amplas dentro de uma caverna –, os estudos e processos práticos (e.g. BOGGIANI et al., 2001, 2007; LOBO, 2006c, 2008b; NATIONAL PARK SERVICE, 2007) têm demonstrado a importância da delimitação do trajeto linear de visitação turística, denominado caminhamento. Este é composto pelo percurso de visitação – evitando ao máximo as fragilidades do ambiente ou, quando impossível, usando de benfeitorias para protegê-las – e pelas áreas de dispersão controlada, utilizadas para a explanação de aspectos interpretativos do ambiente, permitir o descanso dos visitantes ou mesmo para ampliar as fronteiras da percepção do ambiente visitado.

A opção de caminhamento fixo tem sido preferida por três motivos principais:

- Confinamento espacial: na maioria das cavernas, o espaço hábil já é bastante limitado
- Concentração dos impactos de visitação: considerando um ambiente frágil, quanto menor for a área sujeita   pressão antrópica direta, maior a chance de reduzir os impactos ambientais e uma possível degrada o do meio
- Capacidade de carga e gestão: permite um melhor ordenamento da gestão da visita o, facilitando também a obten o de procedimentos de capacidade de carga com base em parâmetros espaciais, temporais, físicos e bióticos.

Com isso, resguarda-se a conserva o do ambiente baseada em suas fragilidades, concentrando os impactos da visita o, sempre que possível, em áreas de maior dispersão ambiental relativa em cada trecho da caverna. As áreas consideradas detentoras de grandes níveis de fragilidade são naturalmente isoladas, recebendo visita o restrita sob um rígido controle – tanto das práticas possíveis quanto dos fatores limitantes ambientais.

4.5. Capacidade de carga turística

A capacidade de carga   uma ferramenta de planejamento e gestão do turismo, tendo sido adaptada do manejo de pastagens agrícolas. O que se busca por meio desta técnica não   a limita o pura e simples do acesso massivo de pessoas, mas sim, identificar a intensidade aceitável de mudanças antrópicas em uma área, embora as aplica es enfatizem a sua condi o desejada de uso (STANKEY et al., 1985; CIFUENTES-ARIAS, 1992). Além disso, a capacidade de carga não se limita a um cáculo numérico, de modo que não   um procedimento final, mas sim, um meio para sustentar e apoiar as decisões de manejo.   também uma técnica relativa e dinâmica, cujos resultados são sujeitos a varia es em fun o das circunstâncias envolvidas na análise das variáveis consideradas (CIFUENTES-ARIAS, 1992) e dos distintos níveis de intensidade e frequência de uso, fragilidade e vulnerabilidade do meio (GALVÃO; STEVAUX, 2010).

Em cavernas, a capacidade de carga permite aos gestores de uma área ou atrativo tomar decisões sobre a intensidade máxima de visita o permitida em um intervalo delimitado de tempo (HOYOS et al., 1998; CARRANZA et al., 2006). Assim, tem sido compreendida como o fluxo máximo aceitável de visitantes em uma caverna, sem que ocorra a altera o da dinâmica ambiental natural (CIGNA; FORTI, 1988; CIGNA; BURRI, 2000; BOGGIANI et al., 2007), Por outro lado, um certo nível

de impactos é aceitável, desde que não altere em definitivo o estado geral de conservação do sistema natural (MANGIN et al., 1999).

De um modo geral, a capacidade de carga é compreendida como

um caminho para a identificação da qualidade da experiência recreacional que seja apropriada para as particularidades do ambiente de cada caverna, bem como determinar quais as condições ambientais coerentes com o tipo de uso projetado. Assim, o enfoque é descentralizado da simples identificação da quantidade de pessoas para a identificação das condições sociais e ambientais que devem prevalecer. Diversas ferramentas de manejo, complementares entre si, têm sido desenvolvidas para tal. Todas elas envolvem a transformação de um princípio qualitativo de manejo para objetivos quantitativos de manejo, usando para tanto indicadores ambientais e padrões pré-estabelecidos (GILLIESON, 1996, p. 250-251).

Em outra definição, considerando que os impactos do turismo são inevitáveis e aceitáveis, a capacidade de carga espeleoturística é definida como

a possibilidade de limitação têmporo-espacial de uso de uma caverna de forma a não gerar danos ambientais, tendo como fator chave a sua capacidade de resiliência. Sua origem deriva das possibilidades de manejo que uma porção territorial pode vir a receber, de forma a mitigar ou diluir em escalas mais amplas os impactos negativos do turismo, tomando como base para o manejo as fragilidades ambientais e as possibilidades de visitação (LOBO, 2008b, p. 383).

A identificação da capacidade de carga depende de um diagnóstico ambiental em condições naturais, bem como da resposta de certas variáveis às visitas monitoradas – preferencialmente antes da abertura da caverna como produto turístico. Depende também dos efeitos naturais do ambiente externo no interno em contraste com as alterações causadas pela presença humana (FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006b). Estas relações de causa e efeito podem variar, levando-se em conta os diferentes níveis de troca de massa e energia nos sistemas subterrâneos (HEATON, 1986; HOYOS et al., 1998; CIGNA; BURRI, 2000; CALAFORRA et al., 2003; FREITAS, 2010). Por outro lado, em muitos casos, é impossível conhecer as condições ambientais naturais de uma caverna, já que os estudos são realizados, em sua maioria, após o início da visitação (CALAFORRA et al., 2003). Por este e outros motivos, em muitos casos é impossível definir um número exato de visitantes em um determinado lugar, de modo que a capacidade de carga acaba sendo usada para satisfazer as obrigações e necessidades de planejamento e gestão (CIGNA; BURRI, 2000), sendo considerada inadequada para o manejo de cavernas, se adotada sob a perspectiva de fixação de valores de visitantes sem considerar que o ambiente, na maioria dos casos, não traz respostas lineares aos impactos que recebe (LOBO, 2008b; FREITAS, 2010). Nestes casos, pode-se dizer que a capacidade de carga corresponde ao número máximo de

peças que o ambiente pode suportar, em função das intervenções realizadas e convenções de gestão adotadas (CIGNA; FORTI, 1988).

Os métodos de capacidade de carga são centrados no meio físico, com raras exceções de uso de aspectos do meio biótico (LOBO, 2008b). A maioria das metodologias conhecidas é de origem descritiva, sem levar em conta a importância da estrutura e distribuição da fauna em seus modelos de avaliação (SILVA; FERREIRA, 2009). Todavia, é de suma importância que a identificação da capacidade de carga de uma caverna seja baseada em estudos multidisciplinares (HOYOS et al., 1998; BOGGIANI et al., 2007). Por outro lado, a maioria dos trabalhos consultados (e.g. CIGNA; FORTI, 1988; PULIDO-BOCH et al., 1997; HOYOS et al., 1998; CIGNA; BURRI, 2000; CIGNA, 2002a, b; CALAFORRA et al., 2003; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006a, b, c; BOGGIANI et al., 2007; LOBO, 2008b; RUSSELL; MCLEAN, 2008) apontam a necessidade do monitoramento espeleoclimático como estudo mínimo para a identificação da capacidade de carga em cavernas, dado que a alteração em parâmetros como a temperatura e a umidade relativa do ar, pode gerar consequências para o restante do ambiente.

Além dos aspectos ambientais, também é preciso considerar a capacidade de carga perceptiva, ou seja, o limite aceitável de uso de modo que o excesso de pessoas não interfira na qualidade da atividade realizada (PAPAGEORGIOU; BROTHERTON, 1999; DOORNE, 2000). Esta questão é essencialmente importante no caso das cavernas, dado seu maior confinamento espacial que, por vezes, restringe bastante o espaço disponível para os roteiros de visitação.

De uma forma geral, Ruschmann et al. (2008) dividem os métodos de capacidade de carga em dois padrões, conforme sua concepção teórico-metodológica: os puramente quantitativos, que buscam obter um resultado numérico final sobre o total de visitas por dia que uma área pode receber; e os focados em modelos de gestão, mais concentrados na identificação de níveis aceitáveis de impactos e, a partir destes, na produção de critérios e ferramentas de manejo condicionados ao monitoramento dos impactos.

Se por um lado a capacidade de carga já se encontra conceitualmente definida, por outro ainda não foi concebido um procedimento padrão para a sua obtenção, existindo diversos métodos aceitos e praticados em escalas locais, regionais ou continentais, os quais dependem também das características da caverna e da visitação turística praticada.

A partir dos trabalhos estudados, foram identificados quatro padrões metodológicos para a identificação da capacidade de carga em cavernas: o coeficiente de rotatividade; o controle baseado em parâmetros ambientais; o método de Cifuentes, desenvolvido para o manejo de trilhas e adaptado para uso em cavernas; e o método da projeção de cenários face às limitações impostas pelos mapas temáticos de fragilidade.

4.5.1. O coeficiente de rotatividade

O coeficiente de rotatividade é a forma mais simplificada de controle de visitação. Boullón (1985) foi o primeiro a defini-la, considerando aspectos básicos, como espaço disponível, espaço necessário por pessoa em função de seus limites psicológicos e motivações de viagem e tempo de execução da atividade em questão. Trata-se, portanto, de uma relação de disponibilidade espacial e temporal, em conjunto com os limites psicossociais dos visitantes.

Esta forma de identificar os limites de visitação ainda é a mais utilizada nas cavernas do Brasil. A maioria das cavernas abertas ao uso público no país toma por base o tempo disponível para a visitação, o tempo utilizado para cumprir o roteiro pré-estabelecido e a distância percorrida, em metros lineares, em um circuito de visitação previamente estabelecido. Nenhum fator crítico do ambiente é usado para determinar o total de visitantes. O máximo que se aplica são propostas de aumento do intervalo de tempo entre os grupos de visitação – o que torna o valor final mais restritivo – com base na capacidade de manejo do gestor e nas características da demanda existente. A grande deficiência desta forma de obtenção de limites de visitação é que, muitas vezes, o potencial de uso de uma caverna pode ser sub ou superestimado. Sem o conhecimento e uso de qualquer critério ou parâmetro ambiental torna-se praticamente impossível identificar os reais limites de uso de uma caverna. Todavia, ainda assim podem ser identificados bons exemplos.

O primeiro deles é bastante útil para o manejo de cavernas verticais. No caso do abismo Anhumas, localizado em Bonito-MS, o limite de visitação é estabelecido em função da dificuldade técnica e do tempo utilizado para se superar os 72 m de desnível, tanto para entrar quanto para sair, bem como pelo tempo gasto para a flutuação no lago em seu interior. Nesse caso, os limites de visitação obtidos são tão baixos (18 pessoas por período do dia, conforme COSTA JÚNIOR, 2004) e a

caverna é tão ampla, de forma a deixar claro que, pela ótica da conservação ambiental, os limites são adequados.

O segundo exemplo nesta linha de capacidade de carga foi identificado no trabalho de Camargo (2008). Este autor agregou ao coeficiente de rotatividade espaço-temporal um fator de risco na visita, levando a obtenção do número máximo de pessoas por grupo que visita uma determinada caverna. Desta forma, na ausência de limites desta ordem orientados por fatores ambientais, bem como no caso de desconhecimento da adequada dinâmica do fluxo turístico, o procedimento pode ser usado para fornecer uma resposta prévia acerca dos limites de visita.

4.5.2. O controle dos parâmetros ambientais

Em cavernas que abrigam vestígios arqueológicos, como pinturas rupestres (e.g. PULIDO-BOSCH et al., 1997), ou em outras onde existem minerais raros em seu interior cuja estabilidade dependa do meio atmosférico (e.g. FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006a), é imprescindível o controle dos parâmetros ambientais mensuráveis em função da visita ou até mesmo a restrição total ao uso público. Na maioria dos casos, privilegia-se o uso de variáveis atmosféricas, dada à facilidade de monitoramento por meio de soluções tecnológicas e a possibilidade de identificação de mecanismos de causa e efeito, relacionando a presença humana à variação identificada (FORD; WILLIAMS, 2007).

Um primeiro exemplo pode ser visualizado no trabalho de Hoyos et al. (1998), que determinaram um limite numérico de 32 pessoas simultaneamente dentro da cueva Candamo, na Espanha, em função dos impactos na temperatura do ar. Os autores postulam que as variações causadas pela visita humana na temperatura do ar não devem exceder à amplitude natural de variação deste parâmetro, no caso, de 0,5 °C. Princípio semelhante foi utilizado por Calaforra et al. (2003) na cueva del Agua de Iznalloz, Espanha. Os autores chegaram a um limite de 53 visitas simultâneas dentro da caverna, que geram alterações da ordem de 0,1 °C na temperatura ambiente. No geodo gigante de Pulpí, também na Espanha, Fernández-Cortés et al. (2006a) explicaram a inviabilidade de sua visita, não somente pelos impactos diretos de pisoteio nos cristais de gipsita, mas também pela grande probabilidade de aumento nas taxas de condensação de vapor d'água na superfície dos espeleotemas, podendo levar à corrosão por condensação. Os autores constataram que apenas três pessoas, em menos de dez minutos, já são suficientes

para acionar este mecanismo de condensação. Além disso, o tempo de normalização dos parâmetros atmosféricos excede um período de 24h, inviabilizando, desta forma, a visitação constante.

Por fim, os trabalhos com uma visão dinâmica e sazonal da visitação. Lario; Soler (2010), na caverna Pozalágua, Espanha, apresentaram uma perspectiva mais inovadora de uso do controle dos parâmetros ambientais. Os autores elegeram dois fatores críticos para a caverna – temperatura do ar e concentração de CO₂ – e os utilizaram de forma sazonal, durante os meses do ano, identificando em cada mês qual o fator que apresentava melhor resposta à visitação. Com isto, estabeleceram uma capacidade de carga variável e dinâmica para a caverna. O mesmo é exposto no trabalho de Freitas (2010), para a caverna Glowworm, na Nova Zelândia. Neste caso, além dos parâmetros atmosféricos – temperatura, CO₂, vento e condensação – também foram consideradas as características da demanda, como o perfil do visitante e a sua sazonalidade.

No Brasil, foram realizados monitoramentos atmosféricos em cavidades naturais com o objetivo de contribuir para o fluxo de visitação, como as grutas do Lago Azul e Nossa Senhora Aparecida, em Bonito-MS (BOGGIANI et al. 2007) e as grutas do Chapéu (SGARBI, 2003), em Apiaí-SP e Santana (SCALEANTE, 2003), em Iporanga-SP. Nos três casos, os parâmetros atmosféricos não foram utilizados para a definição da capacidade de carga de visitação. Em Bonito, por conta da variação natural relativamente alta da temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Nas cavernas paulistas, por conta do curto período de monitoramento contínuo, impossibilitando o conhecimento de sua dinâmica atmosférica subterrânea.

A dificuldade gerada por este tipo de controle, sob a ótica da viabilidade econômica do turismo, é a excessiva limitação imposta ao total de visitantes. Como não são aceitas variações nos parâmetros mensurados – com ênfase na temperatura ambiente e gás carbônico – e se adotam escalas ínfimas de análise, um pequeno número de pessoas já atinge a suposta capacidade de carga do ambiente. A adoção deste nível de restrição se deve à inerente dificuldade de identificar, prever e mitigar os possíveis impactos em aspectos de elevada fragilidade ambiental, como pinturas rupestres, minerais secundários raros ou instáveis.

4.5.3. A capacidade de carga de Cifuentes

A capacidade de carga de Miguel Cifuentes Arias é um método publicado em 1992 e republicado com pequenas adaptações em 1999 (CIFUENTES-ARIAS, 1992; CIFUENTES-ARIAS et al., 1999). Foi originalmente concebido para o manejo de trilhas em áreas de florestas tropicais na Costa Rica, partindo da premissa

de carência de pessoal capacitado, da falta de capacidade de manejo, da insuficiência de informações e das dificuldades que as áreas protegidas dos países em desenvolvimento possam, a curto prazo, contar com sistemas e equipamentos de tecnologia avançada (CIFUENTES-ARIAS, 1992, p. 1).

Trata-se de método amplamente empregado no manejo turístico de áreas naturais, com exemplos de aplicação em trilhas (e.g. CIFUENTES-ARIAS et al., 1999), praias (e.g. RUSCHMANN et al., 2008) e cavernas. Neste caso, a primeira adaptação conhecida deste método em nível mundial foi feita para a gruta do Lago Azul, em Bonito-MS, em 1999 (BOGGIANI et al., 2001, 2007). Outros exemplos foram identificados na caverna Terciopelo, na Costa Rica (CARRANZA et al., 2006), na caverna de Santana (LOBO, 2005, 2008b) e nas cavernas Phong Nha e Tien Son, no Vietnã (NGHI et al., 2007).

O método é dividido em três etapas. Na primeira, chamada de Capacidade de Carga Física (CCF), identifica-se o coeficiente de rotatividade do roteiro de visitação estipulado. Na segunda, a Capacidade de Carga Real (CCR), são inseridos Fatores de Correção (FCs) – situações-problema acerca das fragilidades do ambiente e aspectos que dificultam a visitação. Estes são transformados em um índice de cálculo que é aplicado à CCF, reduzindo-a percentualmente e de modo cumulativo. Na última fase, a Capacidade de Carga Efetiva (CCE), o total de visitantes da CCR é mantido ou reduzido, de acordo com a capacidade de manejo – desejada e existente – do órgão gestor responsável pelo roteiro em estudo.

Na gruta do Lago Azul foram utilizados como FCs aspectos de ordem antrópica, como a dificuldade de acesso do roteiro. Estudos espeleoclimáticos foram realizados na caverna, mas não foram utilizados no cálculo devido à própria dinâmica atmosférica de grande troca gasosa entre o meio subterrâneo e o ambiente externo. Na gruta Terciopelo foi utilizado um FC sobre a fragilidade dos espeleotemas – embora os autores não expliquem quais os critérios utilizados para determinar esse parâmetro. Na caverna de Santana, além de um FC de ordem antrópica ligado ao conforto na visitação, utilizou-se a proposta de Lobo; Zago (2007) com base em Heaton (1986) para os níveis de circulação de energia. Por fim,

nas cavernas vietnamitas, foram usados apenas FCs ligados à gestão da unidade de conservação e ao conforto dos visitantes.

Três problemas podem ser sumariamente identificados nessa metodologia. O primeiro é que a concepção metodológica original é aplicável a trilhas em florestas tropicais, obrigando à adaptação de praticamente todos os FCs sugeridos (chuva, insolação, erosão, conforto social, grau de dificuldade, exposição radicular das plantas etc). O segundo consiste na própria sistemática de cálculo adotada, que sobrepõe os FCs entre si gerando uma redução drástica e injustificada na CCR. Por fim, a análise de Delgado (2006) evidencia que a metodologia não apresenta uma base de nexos causal entre os fatores ambientais ou sociais analisados e os respectivos FCs originados. Desta forma, os resultados obtidos podem até ser coerentes com as expectativas de manejo da área, mas dificilmente irão refletir aspectos da relação entre os possíveis impactos no ambiente subterrâneo e suas possibilidades de mitigação face aos procedimentos de manejo adotados.

4.5.4. Projeção de cenários e mapas temáticos de fragilidade do ambiente

O método de projeção de cenários de visitação para a identificação da capacidade de carga turística foi criado recentemente em uma experiência brasileira de manejo de cavernas. Seu desenvolvimento ocorreu durante a elaboração dos planos de manejo espeleológico de 32 cavernas localizadas no estado de São Paulo. Sua lógica operacional e seus condicionantes de funcionamento foram publicados no trabalho de Lobo et al. (2010b), enquanto a versão completa, até o fechamento desta tese, ainda não havia sido publicada.

O método, de base participativa e que funciona como um modelo de suporte à tomada de decisões, se inicia com a projeção de cenários de visitação, feita por especialistas em planejamento turístico. Os cenários levam em conta os perfis de público a serem atendidos e suas respectivas necessidades, a quantidade ideal de pessoas por grupo para cada tipo de roteiro (escolas, contemplação, aventura etc), a segurança e a sazonalidade turística. Com isso, é estabelecido um valor hipotético para o total de visitas diárias, a ser confrontado com os fatores limitantes à visitação.

Os fatores limitantes são identificados em estudos temáticos por meio de mapas de fragilidade, que também são integrados entre si, gerando os mapas de fragilidade máxima e fragilidade ponderada (Figura 4.12).

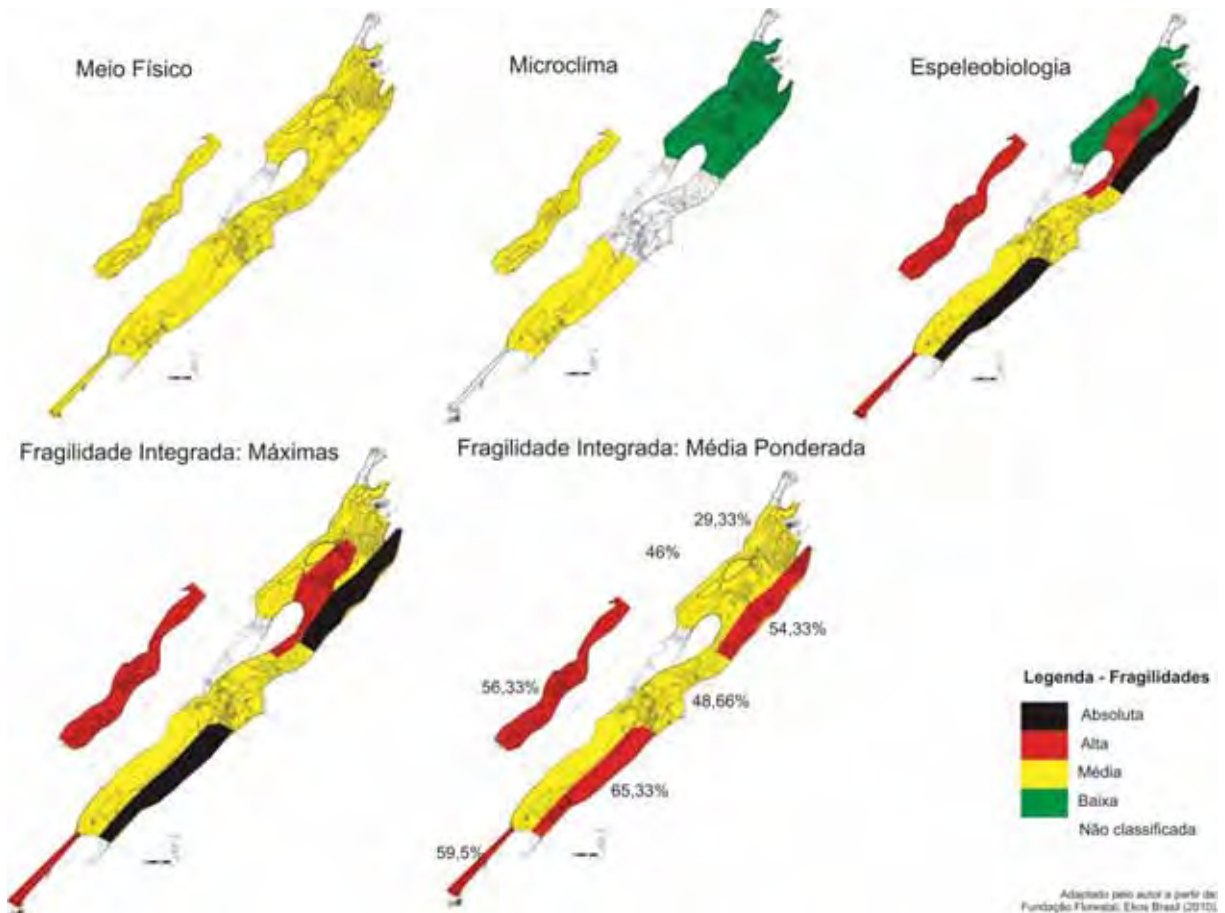


Figura 4.12 – Exemplos de mapas de fragilidade que compõem o método da capacidade de carga provisória de Lobo et al. (2010b), na gruta do Alambari de Baixo, Iporanga-SP (FUNDAÇÃO FLORESTAL; EKOS BRASIL, 2010). A figura ilustra os três mapas temáticos de fragilidade produzidos (meio físico, microclima e espeleobiologia), bem como seus produtos compostos: o mapa de fragilidades máximas, que ilustra a maior fragilidade indicada por área de caverna a partir dos mapas temáticos; e o mapa de fragilidade média ponderada, que é obtido a partir da somatória e posterior divisão dos valores associados a cada uma das zonas de fragilidade dos mapas temáticos.

As fragilidades podem ser compatíveis com o cenário apresentado, não se colocando como detratores dos volumes de visitação, ou apresentarem objeções à proposta inicial, que são negociadas em oficinas de planejamento participativo envolvendo todos os interessados. Ao término do processo, além da obtenção de um valor de visitas diárias – chamado de capacidade de carga provisória –, são elencados os parâmetros para o monitoramento ambiental, que definirá os ajustes necessários ao volume de visitas diárias obtido.

A photograph of a cave entrance. The cave walls are dark and textured, with some white mineral deposits. A metal gate is visible in the background, and a stream of water flows through the cave. The text is overlaid on the right side of the image.

Capítulo 5

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

Antigo portão
na ressurgência do rio Roncador,
acesso para a caverna de Santana,
retirado em 2008.

5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

5.1. Localização

A caverna de Santana, se localiza na bacia hidrográfica do rio Ribeira de Iguape, microbacia do rio Betari, Iporanga-SP, em uma área natural protegida, o Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR). A região está situada no sudoeste do estado de São Paulo, a aproximadamente 350 Km da capital.

O PETAR foi criado em 1958 pelo Decreto Estadual nº 32.283. Possui uma área de 35.102,83 ha, envolvendo parte dos municípios de Apiaí e Iporanga. No parque e em seu entorno imediato, importantes sistemas cársticos se desenvolvem em rochas carbonáticas, cujos corpos aflorantes, bem como a localização da caverna de Santana, podem ser visualizados na Figura 5.1.

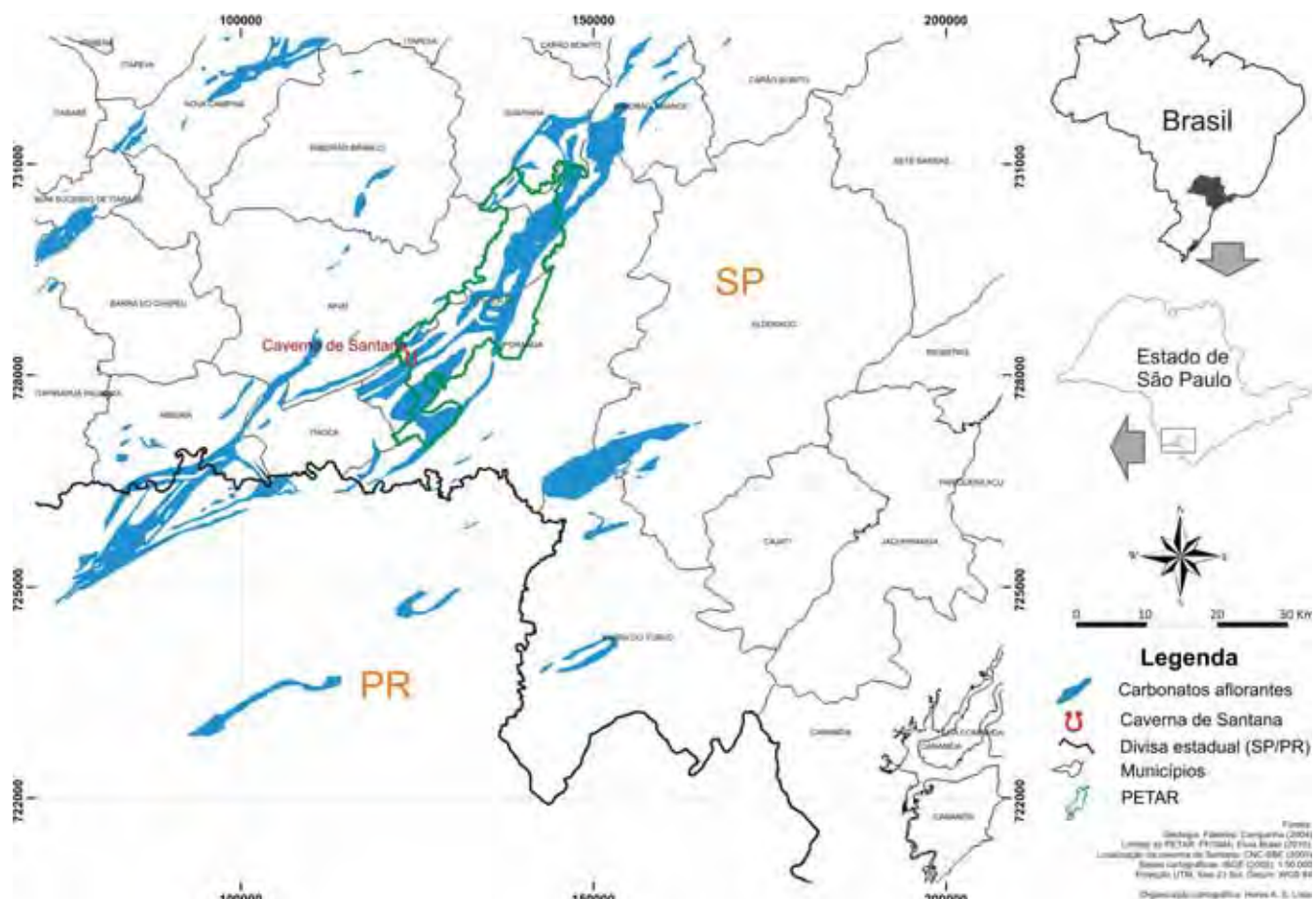


Figura 5.1 – Localização da caverna de Santana em relação aos carbonatos do Supergrupo Açungui, ao PETAR e aos municípios do Vale do Ribeira

5.2. Geologia regional

A caverna de Santana está inserida no contexto geológico regional da sequência deposicional Furnas-Lajeado (PIRES, 1991) da Faixa de Dobramentos Ribeira (HASUI et al., 1975). Estas compõem uma das unidades geológicas do Supergrupo Açungui, o Grupo Votuverava (Subgrupo Lajeado e Subgrupo Ribeira). Outras unidades deste Supergrupo são os Grupos Itaiacoca e Setuva e as Formações Água Clara e Capiru (CAMPANHA; SADOWSKI, 1999). O Supergrupo Açungui é compartimentado em blocos tectônicos que seguem um sistema de zonas transcorrentes de cisalhamento, com direções NE-SW (CAMPANHA, 1991).

A região estudada, correspondente ao Núcleo Santana do PETAR, encontra-se no Grupo Votuverava, Subgrupo Lajeado, em um pacote de rochas pelíticas, carbonáticas e psamíticas terrígenas, incluindo um corpo de gabro no topo, com baixo grau metamórfico, limitado pelo lineamento Quarenta Oitavas a norte e pela Falha da Figueira ao sul (CAMPANHA, 1991; KARMANN; FERRARI, 2002).

As rochas carbonáticas pertencem às formações Bairro da Serra (metacalcarenitos e metacalcilutitos impuros calcíticos e dolomíticos), Mina de Furnas (metacalcarenitos e calcilutitos laminados) e Passa Vinte (metacalcarenitos dolomíticos), sendo que a primeira delas possui maior expressão em área (KARMANN; FERRARI, 2002). Do ponto de vista geoquímico, estes carbonatos apresentam composições distintas de CaO e MgO e variações em sua composição siliclástica. Estas diferenças refletem diretamente na compartimentação dos sistemas cársticos regionais e, por consequência, na distribuição das cavidades naturais (SALLUN; SALLUN FILHO, 2009).

A sequência deposicional Furnas-Lajeado possui espessura variável entre 1200 a 1600 m. Seus principais litotipos são os metacalcários, ocorrendo desde a sua base até o topo. São compostos por calcita, quartzo e sericita, ricos em sulfetos que ocorrem de forma disseminada ou em cristais de pirita e portadores de mineralizações de chumbo, zinco e prata (PIRES, 1991). A região foi classificada por Karmann; Sánchez (1979) como Província Espeleológica do Açungui, uma das principais áreas de ocorrência de cavernas e outras feições cársticas do Brasil. A geologia da região é apresentada na Figura 5.2.

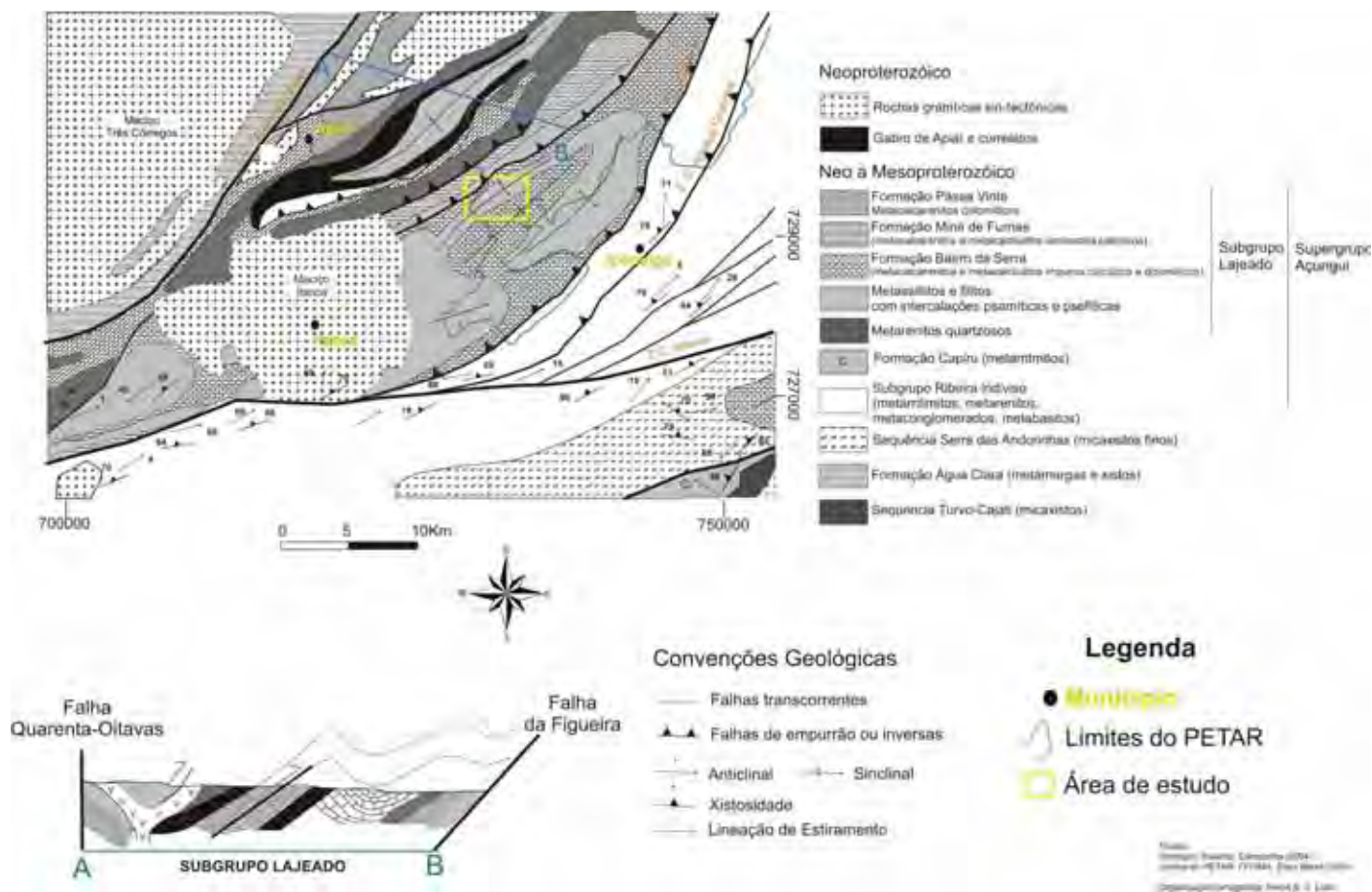


Figura 5.2 – Geologia da região entre os municípios de Apiaí e Iporanga, englobando as Formações do Subgrupo Lajeado

5.3. Sistema cárstico Pérolas-Santana

No PETAR e em seu entorno imediato, quase quatrocentas cavernas já foram registradas. Destas, o presente estudo focou na caverna de Santana. A caverna corresponde à ressurgência do rio Roncador, principal curso d'água do sistema cárstico Pérolas-Santana. Os sumidouros deste sistema se localizam em cotas que variam entre 550-750 m de altitude, enquanto a sua ressurgência está a aproximadamente 250 m de altitude, junto ao nível de base local, o rio Betari. O principal sumidouro do sistema é o córrego Mendes, que se situa a 150 m da caverna Pérolas. Trata-se de um sistema hidrológico misto, com águas autogênicas e forte participação de cursos alogênicos que adentram em seus limites (AYUB, 2007), originados nos filitos, metapelitos e granitos em contato com os carbonatos. Em testes com traçadores, observou-se que o sistema é percorrido em sua totalidade pelas águas em intervalos variáveis entre 44h e 51h 20min (AYUB, 2007), com uma vazão média de 0,384 m³/s (KARMANN, 1994). O sistema Pérolas-Santana possui conexões hidrológicas subterrâneas com outros sistemas cársticos locais, denominados Grilo e Zezo, o que o classifica como um sistema distributário, onde um sumidouro se conecta com mais de uma ressurgência (AYUB, 2007).

A área carbonática correspondente ao sistema cárstico Pérolas-Santana é formada por uma faixa metassedimentar de direção NE-SW, representando uma estrutura homoclinal, com direção NE de acamamento e mergulhos moderados a altos para NW. As rochas carbonáticas formam uma faixa deprimida, com área de exposição em planta de aproximadamente 27,5 km². É interceptada pelo rio Betari a jusante do sistema, sua única saída de escoamento superficial. A presença de vales fluviais ativos sobre os carbonatos e significativa injeção alogênica caracterizam a região como um fluviocarste. A morfologia geral dos morros e morrotes é de cones cársticos assimétricos, estruturalmente condicionados, alinhados pela direção do acamamento e truncados por juntas transversais. A superfície dos calcários é bastante irregular, com poucos afloramentos em função da densa cobertura vegetal e de um espesso manto de solo residual (KARMANN, 1994). Uma visão geral do sistema cárstico Pérolas-Santana é apresentada na Figura 5.3.

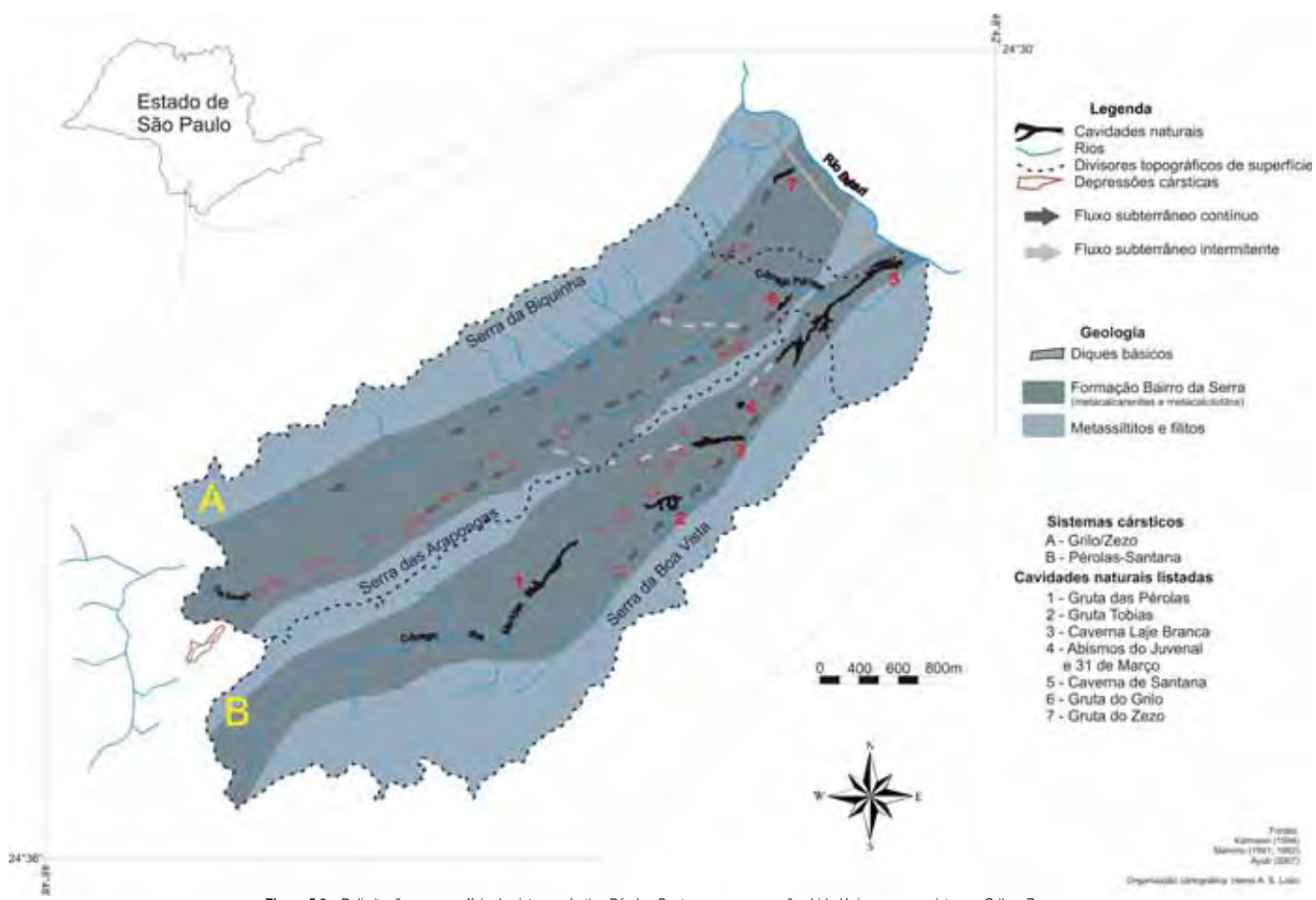


Figura 5.3 – Delimitação em superfície do sistema cárstico Pérolas-Santana e suas conexões hidrológicas com os sistemas Grilo e Zezo

A idade mínima identificada por Karmann (1994) para o sistema cárstico Pérolas-Santana é de aproximadamente 2 milhões de anos, a partir de análises de $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ em calcita secundária, o que permitiu estimar as taxas de entalhamento vadoso. Em seu estudo, o autor obteve uma taxa de rebaixamento médio do leito fluvial subterrâneo de 4,2 cm/1000 anos. Valor próximo foi obtido por Viana Júnior (2002), com uma taxa de rebaixamento do epicarste na região do salão Ester de 4,5 cm/1000 anos. Em outro estudo, Kinoshita et al. (2005) apresentam uma idade aproximada de 1,4 \pm 0,7 mil anos para um espeleotema da caverna de Santana.

A caverna de Santana está inserida na Formação Bairro da Serra do Supergrupo Açungui. Segundo Campanha (1991), é a unidade com maior expressão em área na região, formada por dois corpos distintos: a faixa carbonática homoclinal da caverna de Santana; e outro, irregular, estruturado pelo sinclinal do Bairro da Serra, Anticlinal do Sem Fim e o flanco invertido do anticlinal do Bairro Betari. A Formação é composta por metacalcarenitos e metacalcilutitos impuros e margosos, predominantemente calcíticos e localmente dolomíticos, de coloração cinza escuro. Caracteriza-se também pela alternância de estratos mais ou menos impuros, com frequentes intercalações de metassiltitos carbonáticos e filitos.

Em sua morfologia atual, a caverna de Santana é formada por uma extensa rede de condutos subterrâneos, cujos trechos acessíveis possuem 7.200 m já mapeados, conforme dados oficiais do Cadastro Nacional de Cavernas (CNC) da SBE (SBE, 2010)³, e um desnível total de 54 m (GPME, 2009). Em sua maior parte, a caverna é composta por canyons subterrâneos de entalhamento vadoso, embora salões pontuais formados por abatimento e dutos de sua fase de iniciação freática também possam ser observados. A Figura 5.4 apresenta uma visão geral, em perfil e em planta, da caverna de Santana, bem como um detalhe de seu trecho turístico e adjacências imediatas, sendo esta a área de enfoque do presente estudo. Trechos de seus condutos e salões podem ser observados na Figura 5.5.

³ Este mapeamento está sendo refeito pelo Grupo Pierre Martin de Pesquisas Espeleológicas. Até dezembro de 2010, dados não oficiais apontavam para um desenvolvimento total de quase 9 km.

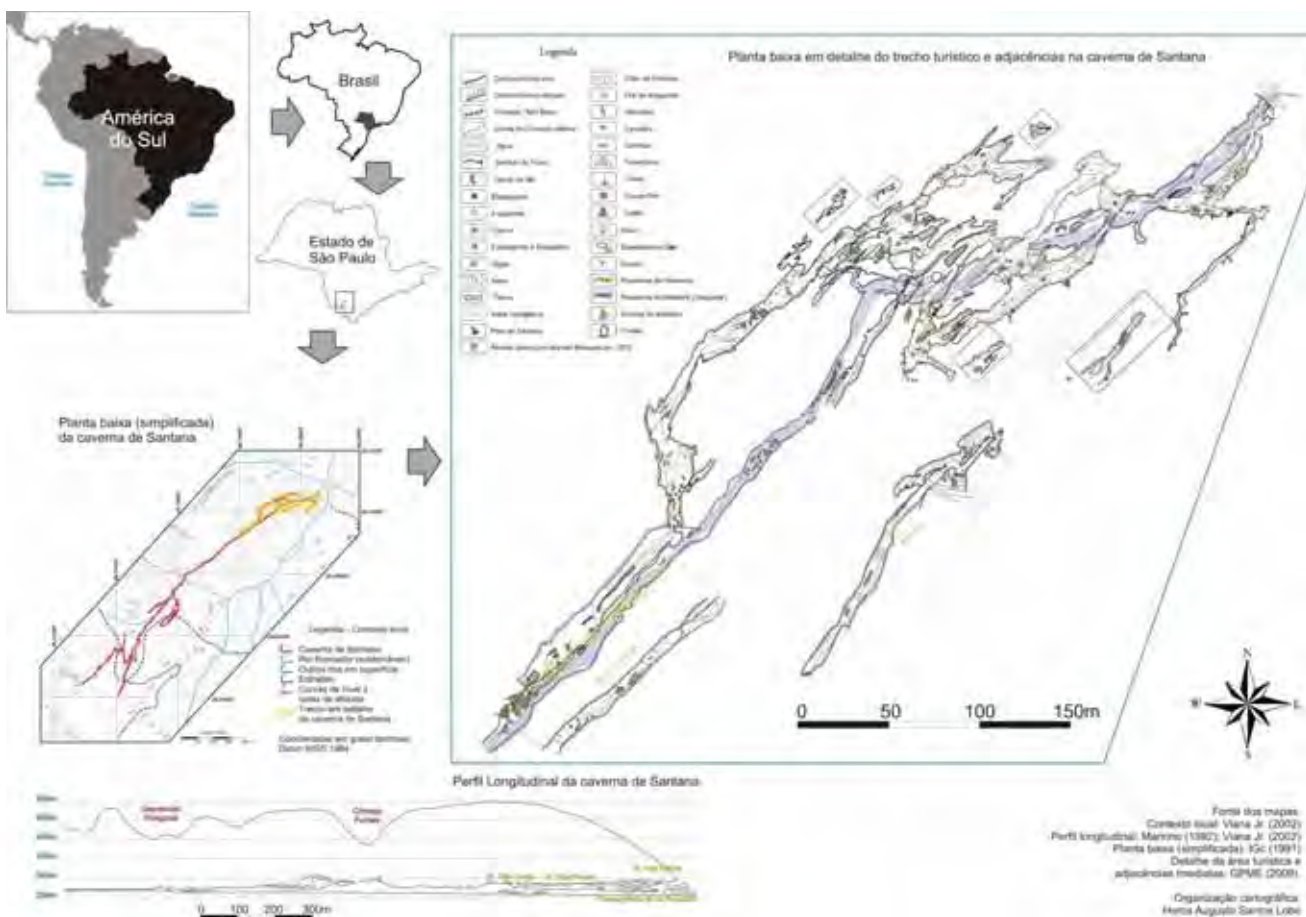


Figura 5.4 – Localização da caverna de Santana e detalhe das galerias com visitação turística e adjacências imediatas

Fonte dos mapas:
 Conteúdo geral: Viana Jr. (2002)
 Perfil longitudinal: Marinho (1982); Viana Jr. (2002)
 Planta baixa (simplificada): IGC (1991)
 Detalhe da área turística e adjacências imediatas: GPNE (2008).
 Organização cartográfica:
 Helder Augusto Santos Lobo

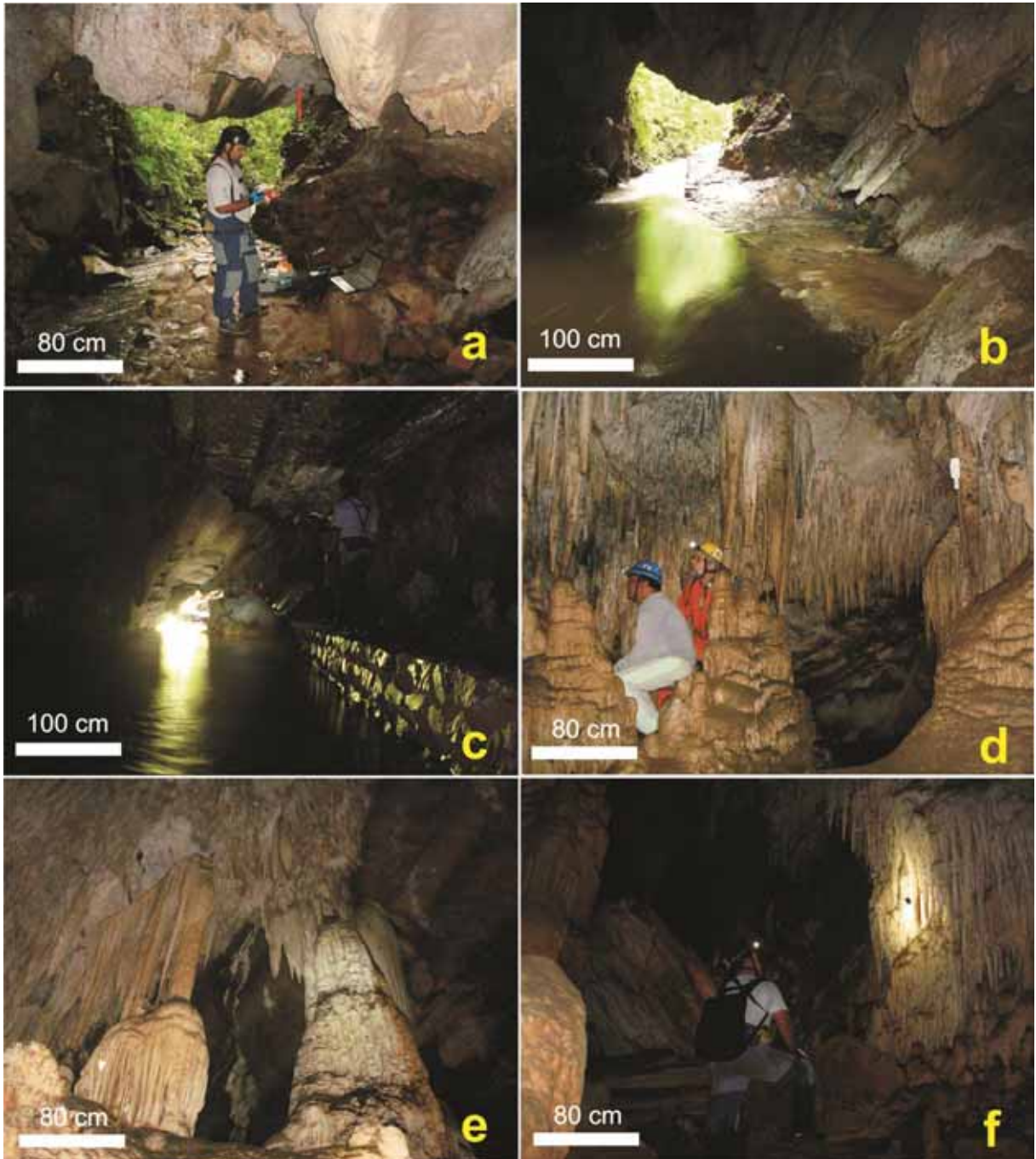


Figura 5.5 – Trechos da caverna de Santana: a) entrada da caverna, pela ressurgência do rio Roncador; b) rio Roncador em dias de chuva, com alagamento parcial que ocorre em toda a galeria; c) trecho a montante do rio, ilustrando a formação do conduto em ambiente vadoso e as passarelas construídas para a visita turística; d) salão do Cristo, com diversas estalactites, estalagmites e colunas; e e f) trechos da galeria do rio Morto, caverna que foi capturada pelo entalhamento vadoso da galeria principal do rio Roncador.

A caverna é ricamente ornamentada por depósitos químicos secundários, tanto em variedade quanto em quantidade. Além de estalactites, estalagmites, escorrimentos, colunas, cortinas e travertinos, uma série de outros espeleotemas também são encontrados em seu interior, como discos, velas, flores de aragonita e

calcita, antodites, dentes de cão, pérolas e muitas outras formas. Alguns destes espeleotemas são ilustrados na Figura 5.6.

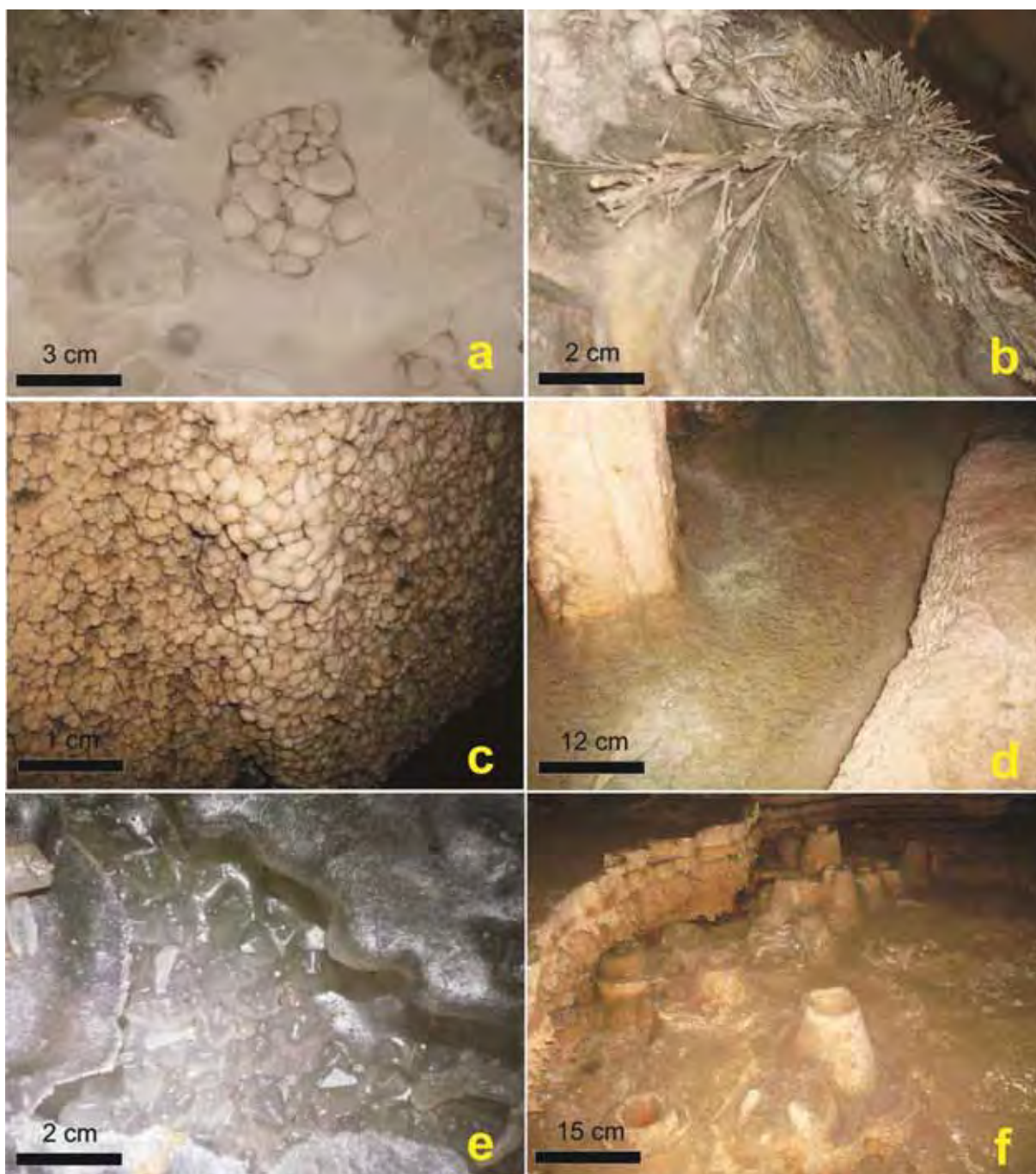


Figura 5.6 – Diversas ocorrências de espeleotemas na caverna de Santana, muitas delas, pouco comuns para a área cárstica do Vale do Ribeira: a) ninho de pérolas em formação, na galeria do rio Morto; b) flores de aragonita, do salão das Flores; c) coralóides formados pela dissolução da rocha por meio da capilaridade intraporosa associada a evaporação de microfilmes de água em superfície rochosa, no salão São Paulo; d) jangadas de calcita em piscina de água estagnada, em galeria superior intermediária; e) cristais dente de cão, em pequenas represas de travertinos atualmente inativas, no salão São Jorge; f) vulcões, associados aos travertinos incrustados de dentes de cão, no salão dos Vulcões.

Além da ênfase nas formas dos depósitos, outro aspecto igualmente diverso é a variedade de minerais de cavernas na Santana. O trabalho de Forti et al. (2000) apresenta uma síntese das principais ocorrências, além de acrescentar novos minerais até então não identificados (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Minerais de cavernas já identificados nas cavernas Pérolas (sumidouro do rio Roncador) e de Santana (ressurgência)

Mineral	Composição Química	Ocorrência Registrada
Aragonita ¹	CaCO ₃	Pérolas, helictites, leite de lua, estalactites.
Calcita ¹	CaCO ₃	Todos os tipos de espeleotemas.
Celestita ²	SrSO ₄	Pequenos cristais euédricos.
Gipsita ¹	CaSO ₄ 2H ₂ O	Cristais, crostas, helictites.
Hidromagnesita ¹	Mg ₅ (CO ₃) ₄ (OH) ₂ 4H ₂ O	Leite de lua, pó.
Hidroxiapatita ¹	Ca ₃ (PO ₄) ₃ (OH)	Crostas, pó.
Illita ²	(K, H ₂ O)(Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ , H ₂ O]	Massas cinzentas rígidas, translúcidas, dispersas em crostas enriquecidas de lítioforita.
Leucofosfita ¹	KFe ₂ (PO ₄) ₂ (OH) 2H ₂ O	Crostas, pó.
Limonita ^{2*}		Crosta laminar sobre a pirita.
Lítioforita ²	(Al, Li) MnO ₂ (OH) ₂	Crosta laminar negra-translúcida.

Fonte: (1) Barbieri (1993); (2) Forti et al. (2000); * Sem composição química indicada na fonte.

A diversidade de minerais e formas dos espeleotemas se ressalta em meio a beleza e variedade morfológica da caverna de Santana. Em conjunto com seus recursos hídricos, feições morfológicas, atmosfera e sua dinâmica ambiental, estão entre os principais aspectos que justificam a sua necessidade de geoconservação.

5.4. Clima regional

O clima na região do médio-alto curso do rio Ribeira de Iguape foi classificado por Monteiro (1973), em sua análise da dinâmica climática do Estado de São Paulo. Trata-se de um clima meridional permanentemente úmido, controlado por massas tropicais e polares. A atuação das Massas Polares Atlânticas é mais significativa (60%) do que a das Massas Tropicais Atlânticas (40%). A sua unidade rítmica se caracteriza pela elevada frequência de penetração de massas polares e passagens frontais, em todas as estações do ano.

As variações térmicas predominantes na região ocorrem em função da altitude e, secundariamente, da latitude. A circulação atmosférica regional possui um ritmo tipicamente irregular, conforme os regimes pluviais, em uma área de influência

oceânica secundária. O intervalo de tempo compreendido entre dezembro e fevereiro é, historicamente, mais chuvoso (33% do total das chuvas anuais), enquanto que o período entre junho e agosto é o mais seco (18% do total). A precipitação média anual é de 1.500 mm – atingindo valores entre 100 mm e 300 mm em um período de 24h –, enquanto a temperatura média anual varia entre 19 °C e 21 °C (GUTJAHR; TARIFA, 1993). A precipitação elevada se justifica pela alternância de atuação de diversos sistemas atmosféricos, com destaque para o Anticiclone Polar Atlântico, o Sistema Tropical Continental, as Frentes Polares e o Anticiclone Tropical Atlântico (GUTJAHR; TARIFA, 1995).

A umidade relativa do ar (UR) é influenciada pela floresta atlântica, ficando próxima dos índices de saturação (100%) durante o ano todo, com flutuações diárias geradas pela insolação. Nestes casos, a UR chega a valores próximos a 60%, retornando para a condição de saturação no fim do dia (CRUZ JÚNIOR et al., 2005).

Não somente a floresta atlântica influencia na UR e na temperatura ambiente, mas também a compartimentação geomorfológica. A região da caverna de Santana é composta por uma sequência de fundos de vales, formados por poligonais fechadas, que conservam bolsões de ar em seu interior, caracterizando típicos microclimas. Conforme explica Bailey (2005), nestes casos a circulação catabática da atmosfera – impulsionada pela ação da gravidade nas camadas mais úmidas, portanto densas de ar – possui grande influência, conservando por mais tempo as condições habituais dos atributos atmosféricos, de modo a não os sujeitar em mesma grandeza às alterações mais drásticas do clima regional (Figura 5.7).



Figura 5.7 – Fotos de episódios atmosféricos do clima regional e microclima. Mirante da Boa Vista, com o rio Betari localizado ao fundo do vale do rio Betari, em um dia típico da época de menor incidência de chuvas (a), com massas de ar mais confinadas nos fundos de vale e vegetação menos exuberante, em julho de 2009; e no auge da época das chuvas (b), em fevereiro de 2010. Em seu fundo, o rio Betari (c), com camada nebulosa sobre sua calha, em função da condensação do ar mais denso.

Para a região da caverna de Santana, Viana Júnior (2002) conduziu um primeiro estudo de monitoramento espeleoclimático, no período entre julho de 2000 e junho de 2001. Na ocasião, a média anual da temperatura externa foi de 18 °C (mín. -0,2 °C; Máx. 28,3 °C), com o mês de julho de 2000 apresentando a média mais baixa (9,6° C) e o mês de fevereiro de 2001 a mais alta (22,5 °C). Outro dado digno de nota foi o registro de amplitudes diárias de grande magnitude, chegando a 15° C em uma ocasião. Para o mesmo período, a UR variou entre 62,4% e 100%. No mesmo período, o monitoramento das chuvas apontou índices elevados de pluviosidade nos meses de fevereiro (226,48 mm), novembro (184,1 mm) e dezembro (217,9 mm) de 2000, bem como janeiro de 2001 (208,8 mm). O período mais seco foi evidente nos meses de abril e maio de 2000, respectivamente, com 3,2 mm e 5,7 mm no mês.

Outro aspecto importante deste estudo foi o monitoramento espeleoclimático da caverna de Santana pelo período de um ano, em dois pontos distintos, os salões Flores e Ester. Na ocasião, o salão das Flores manteve suas condições atmosféricas estáveis durante o ano todo, com a temperatura do ar marcando os 19,4 °C e a UR em ponto de saturação. O mesmo foi registrado para o salão Ester, com saturação da UR e temperatura constante de 18,7 °C.

Além disso, cabe mencionar que outros trabalhos pontuais foram feitos sobre o espeleoclima da caverna de Santana. A primeira tentativa foi de Barbieri (1993), mas a precisão do sensor utilizado prejudicou os resultados. Em outro estudo, Scaleante (2003) fez monitoramentos pontuais, de forma a verificar os impactos do uso de carbureteiras. Em sua maioria, os monitoramentos foram executados em intervalos de aferição e registro de dez minutos, durante o período de uma hora. Esta descontinuidade temporal impede que conclusões sejam subtraídas dos dados, embora os valores obtidos nas estações sejam condizentes com o clima regional descrito em Gutjahr; Tarifa (1993) e com o monitoramento de Viana Júnior (2002).

5.5. Histórico da exploração, visitação e o turismo na caverna de Santana

A caverna de Santana está entre os principais ícones historiográficos da espeleologia paulista. Sua descoberta é datada de 1907, pelo naturalista alemão Richard Krone. À época, este que é um dos precursores da espeleologia paulista e nacional (FIGUEIREDO, 2010) – em conjunto com o agrônomo italiano Lourenço Granato –, denominou-a de gruta do Roncador, sem, no entanto, sequer tê-la explorado, reportando apenas a localização de sua entrada – a ressurgência do rio Roncador (BRANDI, 2007). Esta opção, provavelmente, se deu em função da restrição de acesso a cavidade, que era de difícil passagem devido à pequena entrada praticamente inundada pela ressurgência.

A dificuldade de acesso foi parcialmente contornada no período entre 1930 e 1932, a partir dos trabalhos do engenheiro Theodoro Knecht. Com a finalidade de ampliar a exploração aurífera na região, este engenheiro promoveu a desobstrução parcial da boca da caverna, bem como a construção de uma extensa passarela em seu interior (LE BRET, 1995). O trabalho foi feito pelos Sres. José Pinto e Braz de Andrade Resende, moradores locais. A esta época, o nome da cavidade natural foi alterado para gruta Sant'Anna⁴, pela referida equipe (MARTIN, 1976).

Em seu próprio relato, Knecht menciona as suas impressões e perspectivas para a caverna de Santana:

No vale do rio Betari, tanto na sua margem direita como na esquerda, são conhecidos além de outras grutas secas, quatro cavernas percorridas por grandes tributários [*sic*] do rio Betari. A caverna do Corrego [*sic passim*] Grande, cerca de 200 metros distante do rio Betari e 250 metros do atual

⁴ Não é mencionado o motivo do nome. Em consultas feitas aos espeleólogos Maurício de Alcântara Marinho (GPME), Ericson Cernawsky Igual (GPME) e José Antonio Basso Scaleante (GESCAMP), foi levantada a hipótese de alusão ao nome da padroeira do município de Iporanga.

nível, recebe todas as suas águas [sic] da parte Sul da Serra da Bôa Vista. Pouco mais ou menos a 2 quilômetros [sic *passim*] para o Sul, está situada a caverna Sant'Anna. Essa caverna, cuja entrada fica a cerca de 15 metros acima do nível [sic] do rio Roncador, maior afluente do rio Betari, representa-se conforme o seu comprimento de mais de 15 quilômetros, como a maior caverna que existe na região. As vertentes do rio Roncador são formadas pelo correjo Salgado na Fazenda Vidal, e pelo ribeirão da caverna Laje Branca. (...) Pelos estudos feitos por ordem do Sr. Oswaldo Sampaio, a caverna do Roncador foi levantada até um comprimento [sic] de 2 quilômetros e meio, ponto em que o estreitamento impediu a continuação dos estudos. O curso subterrâneo [sic *passim*] do Roncador não acompanha como é de regra a direção das camadas calcárias [sic], mas atravessa pela força erosiva as diversas camadas e também [sic *passim*] os filitos, os quais [sic] provocaram uma obstrução e estreitamento da caverna em diversos lugares. (...) O cascalho depositado pelo rio Roncador nesta caverna, é aurífero com teor apreciável [sic] em ouro, porque esta caverna corta no seu curso subterrâneo também, a continuação ocidental do veeiro de ouro da Serra de Lavras. Conforme a sua direção Nordeste [sic] pretendia-se encontrar pela caverna as partes mais profundas do filão de Furnas. Entretanto conseguimos chegar somente [sic] até 400 metros perto do filão, devido à mudança de rumo do Roncador mais para o Oeste [sic], porém no futuro será essa caverna de grande utilidade para a mineração (KNECHT, 1935, p. 107-108).

A expectativa de extração de galena na região por meio da caverna de Santana viria a ser definitivamente frustrada em 1958, com a criação do Parque Estadual do Alto Ribeira (PEAR), por iniciativa do engenheiro Eptácio Passos Guimarães – responsável pela guarda deste patrimônio, tendo sido designado pelo extinto Instituto Geográfico e Geológico do estado de São Paulo (LE BRET, 1995; FIGUEIREDO, 2010). Dois anos depois, sua vocação maior se confirma com a alteração de seu nome, agregando o adjetivo “turístico” e transformando-o no atual PETAR (FUNDAÇÃO FLORESTAL; EKOS BRASIL, 2010).

As explorações da caverna de Santana são retomadas em 1964, sob coordenação do engenheiro Pierre Martin. A primeira versão da topografia da galeria do rio, totalizando aproximadamente 2.500 m⁵, data deste ano (MARTIN, 1976), sendo refeito sob seu próprio comando em 1968. No mesmo ano, a Prefeitura Municipal de Iporanga – instigada com o sucesso do início do turismo na caverna do Diabo – inicia a estruturação turística da caverna. Para tanto, contrata o Sr. Milton, ex-funcionário da mineração Furnas e genro do Sr. Braz de Andrade Resende, àquela época, proprietário das terras que abrigam a entrada da caverna. Com uso de britadeira e dinamite, Milton abre definitivamente o acesso para a caverna e, em conjunto com o Sr. Braz, constrói os primeiros 200 m de passarelas de madeira para a visitação turística da Santana. Milton também descobre as galerias superiores,

⁵ Figueiredo (2010) cita que ainda em 1964 a topografia atingiu 4.000 m, embora em seu artigo de 1976, o próprio Pierre Martin não faça menção a este feito.

abrindo novas perspectivas para a exploração da caverna, com a descoberta de salões como Discos, Vulcões e São Paulo (LE BRET, 1995).

Paralelamente, em 1970 é descoberta a gruta das Pérolas, pelos espeleólogos Guy Collet, Luís Marinho, Philippe, Vandir de Andrade e Joaquim Justino dos Santos (SBE, 1970). Sua exploração e início de topografia são feitos em 1971 (COLLET, 1976a). A partir desta descoberta, iniciam-se também os estudos que visam comprovar a conexão entre esta e a caverna de Santana. Nos anos seguintes, iniciam-se também os testes de conexão hidrológica na região com uso de floresceína nos sumidouros e captoreiros químicos de carvão ativado nas ressurgências, como demonstrou o trabalho de Slavec (1976a). Em 1976, foi feita a comprovação da ligação do sistema (SBE, 1976).

Na continuidade, a caverna foi visitada em 1972 pelo geólogo Manoel Marques de Almeida, que ao forçar uma passagem após uma rede conhecida como galeria da Paca, encontra o que foi denominado à época de “Capela Sistina⁶” das cavernas, o salão das Flores. Até o final de 1974, a topografia da caverna atinge 4.880 m (MARTIN, 1976). Em janeiro de 1975 –, a caverna de Santana abrigou um dos maiores experimentos subterrâneos já feitos no Brasil, a Operação Tatus. Nela, um grupo de 11 espeleólogos permaneceu por 15 dias, sem nenhuma referência temporal, em um experimento de cronobiologia e permanência subterrânea. O mapeamento da caverna continuou, bem como foram feitos estudos sobre biologia subterrânea e espeleoclima. No entanto, a grande descoberta na caverna de Santana feita nesta expedição foi o complexo Taqueupa⁷, uma rede de galerias superiores no fundo da caverna, repleta em variedade e quantidade de espeleotemas (BRANDI; CAMARGO, 2008).

Em meados do final dos anos de 1980 e início dos anos de 1990, o Grupo de Espeleologia da Geologia USP (GGEO) fez o primeiro mapeamento completo da caverna de Santana, cujo mapa foi tornado público em 1991, totalizando 5.040 m de galerias mapeadas. Sendo relatou o professor Ivo Karmann (IGc/USP), parte dos

⁶ Referência a uma capela situada no Palácio Apostólico, residência oficial do Papa, no Vaticano. Seu teto abriga os famosos afrescos de Michelangelo, feitos entre 1508 e 1512, patrimônio histórico e cultural da humanidade. A comparação não é novidade em cavernas, já que as cavernas de Altamira (Espanha) e Lascaux (França) recebem o mesmo “título”, neste caso, por conta de seus conjuntos de pinturas rupestres.

⁷ Muito provavelmente uma cavidade natural de origem por águas autogênicas que foi capturada pelo entalhamento do rio Roncador em sua evolução, tal como descreve Karmann (1994).

registros de campo teria se perdido, o que inviabilizou a inserção da região do salão das Flores neste mapa.

Na atualidade, desde 2007 e até o fechamento desta tese (dezembro/2011), a caverna de Santana está sendo retopografada em sua íntegra pelo Grupo Pierre Martin de Espeleologia (GPME), considerando todas as conexões e mesmo as galerias após os sifões no fundo da galeria do rio. O objetivo é verificar eventuais inconsistências de trabalhos anteriores, anexar galerias até então não inclusas – como o salão das Flores e a Santaninha – e mapear novas galerias, inclusive após o sifão no fundo da caverna.

A beleza singular, a facilidade de acesso e a profusão e beleza de seus conjuntos de espeleotemas estão entre os fatores que sempre atraíram turistas para a caverna de Santana e, conseqüentemente, para a região.

Assim, a partir dos anos de 1980 o turismo começa a se intensificar no PETAR, principalmente com a estruturação física do Núcleo Santana em 1983, feita pela Superintendência de Desenvolvimento do Litoral Paulista (Sudelpa). Em 1985, sua efetiva implantação é iniciada, no âmbito do Grupo de Parques e Reservas do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA). Todavia, o término da implantação definitiva do Núcleo Santana ocorreu em 1989 (MARINHO, 2002).

A partir dos anos de 1990, o bairro da Serra começou a passar por inúmeras transformações físicas, fundiárias e sociais, decorrentes do crescimento nos volumes de visitação (FOGAÇA, 2008). O perfil dos visitantes também foi sendo modificado, saindo de uma maioria formada por espeleólogos – que demandavam estruturas menos confortáveis de hospedagem e alimentação simples –, para a quase totalidade de turistas. Estes, por sua vez, não tinham amplo conhecimento da região, de seus riscos e das cavernas, o que propiciou o surgimento de uma das figuras mais emblemáticas do turismo no PETAR: o monitor ambiental. Tradicionalmente, o monitor ambiental é um morador local, ex-mateiro ou jovem que não possuía muitas perspectivas de ocupação formal na região. Os cursos de monitores ambientais se iniciaram em 1995, por iniciativa da sociedade civil organizada e com apoio do próprio Parque. Na atualidade, o monitor ambiental é reconhecido como agente prático da conservação das cavernas, além de sua função básica de condução de visitantes.

Se o crescimento do turismo no PETAR foi vertiginoso a partir dos anos de 1990, o incremento quantitativo em sua gestão não foi proporcional. Com o tempo,

diversos problemas decorrentes do uso público foram aflorando. Dentre as falhas evidentes, ressalta-se a inexistência de controle formal dos fluxos de visitação nas cavernas e a ausência de um plano de manejo espeleológico, ambos iniciados apenas em meados de 2008. Até então, o controle da visitação era feito apenas por Núcleos, e não por cavernas, de forma a ser impossível saber qual o real fluxo de visitação histórica da caverna de Santana. A Figura 5.8 traz dados da visitação do Núcleo Santana (que engloba as cavernas Santana, Morro Preto, Couto, Água Suja e Cafezal), e a Figura 5.9 apresenta resultados específicos obtidos na fase atual de gestão, sobre a caverna de Santana.

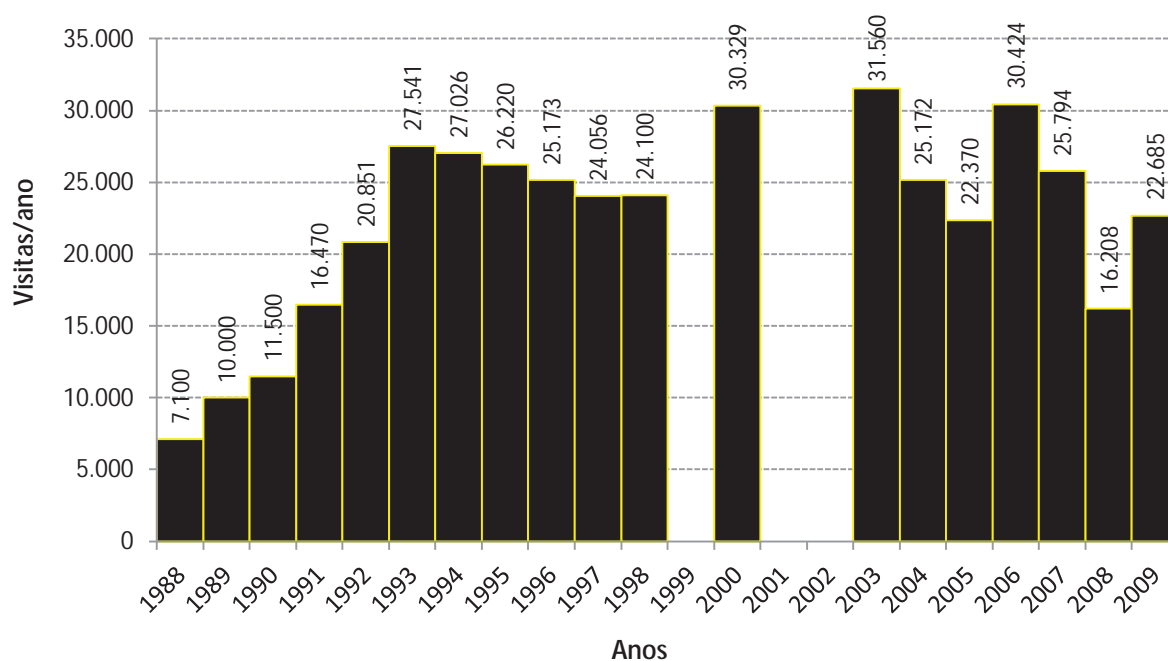


Figura 5.8 – Fluxo anual de visitação do Núcleo Santana do PETAR. Fonte de dados: Marra (2001), Lobo (2004) e PETAR/FF (2010).

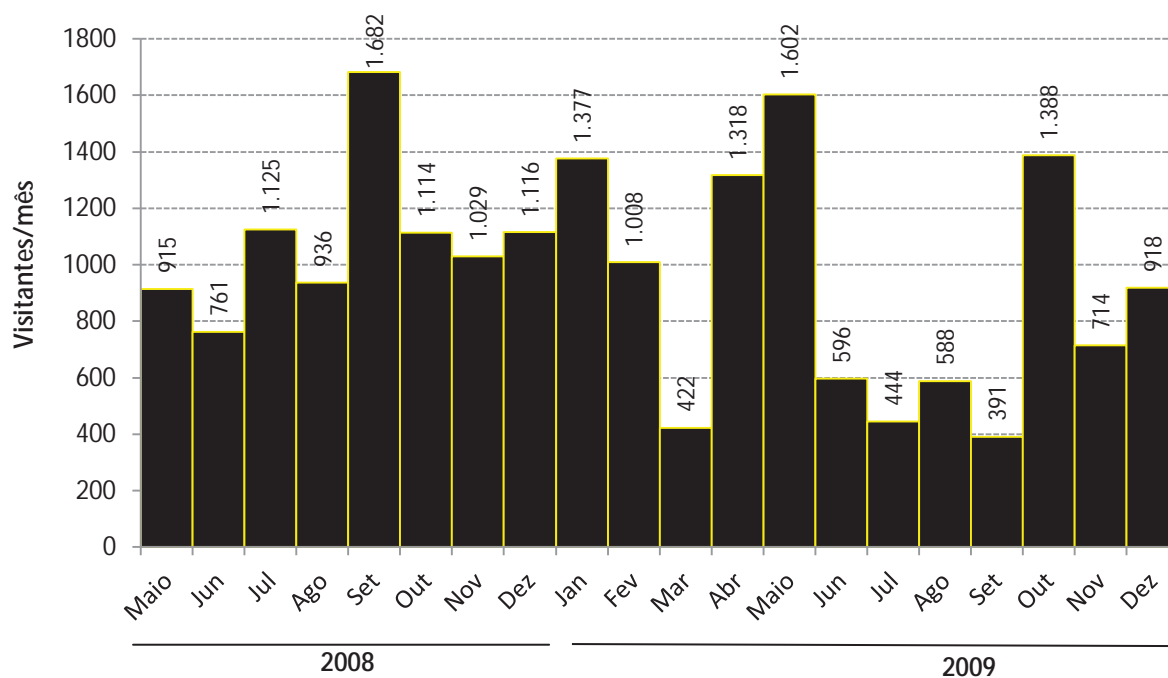


Figura 5.9 – Fluxo mensal de visitação na caverna de Santana- período maio/2008 – dezembro/2009. Fonte de dados: PETAR/FF (2010).

A contagem diária de visitantes por caverna, o que resulta nos totais mensais, é fruto dos trabalhos visando o plano de manejo espeleológico da caverna, exigido pelo Ministério Público. Em fevereiro de 2008 a caverna de Santana e todas as demais cavidades naturais abertas ao turismo na região foram fechadas, sendo reabertas apenas em maio do mesmo ano, a partir da assinatura de um Termo de Ajustamento de Conduta (TAC). Os trabalhos para elaboração de seu plano de manejo se iniciaram em janeiro de 2009, tendo sido encerrados em junho de 2010.

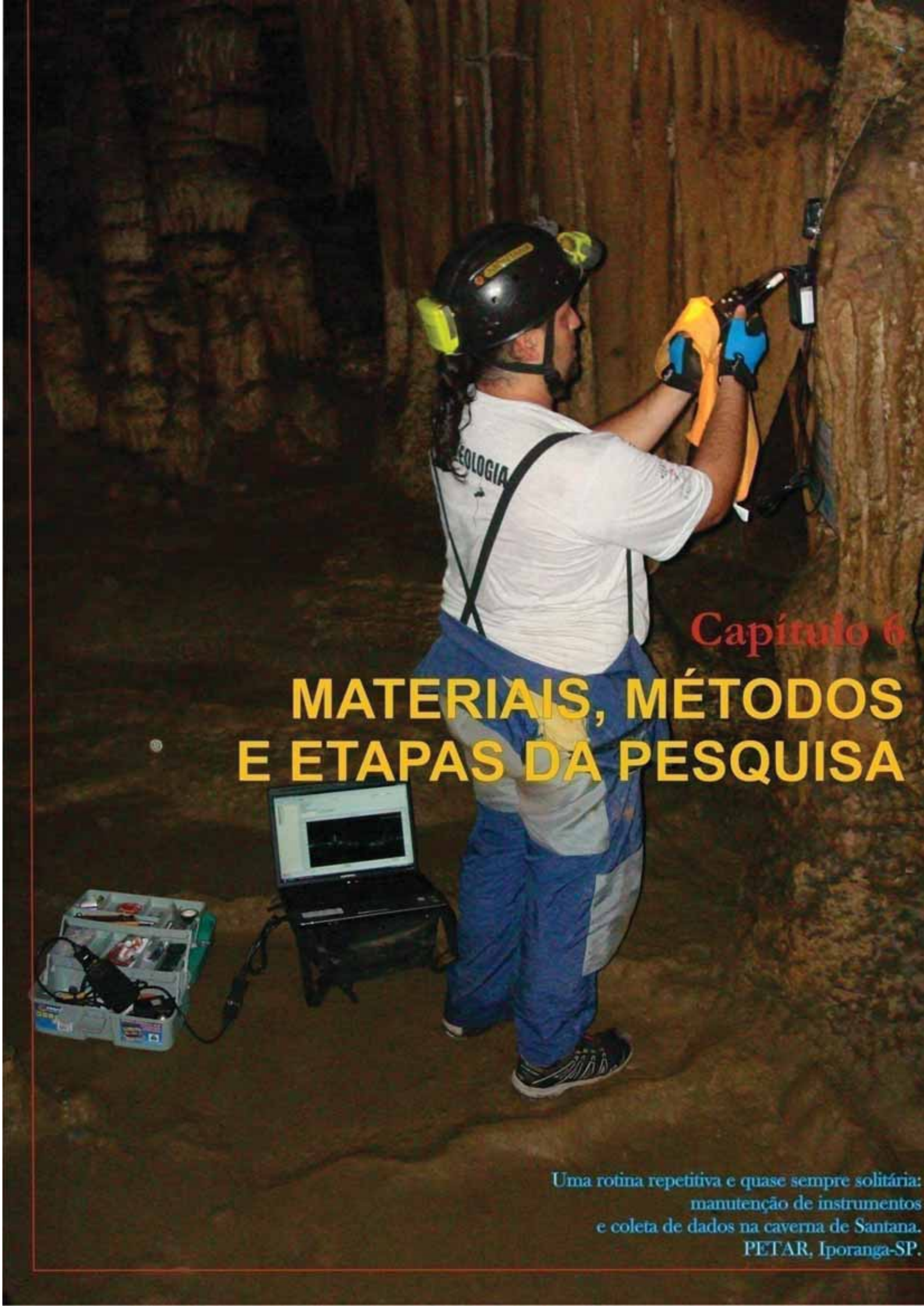
Além do turismo, diversos interesses convergem cada vez mais para a região, tanto no desenvolvimento de trabalhos espeleológicos quanto de pesquisas científicas. Considerando apenas os temas abordados na presente pesquisa, os principais trabalhos são brevemente citados.

O início das pesquisas científicas na caverna de Santana data do final dos anos de 1980 e início dos anos de 1990. Um estudo sobre a geomorfologia da área do sistema cárstico Pérolas-Santana foi conduzido nos trabalhos de Marinho (1989, 1992), servindo de base para todos os estudos posteriores na região. Na continuidade, Karmann (1994) apresentou amplo estudo sobre a evolução espeleogenética e dinâmica hidrogeológica atual do sistema Pérolas-Santana. Outro trabalho contemporâneo foi produzido por Barbieri (1993), que compilou os principais minerais secundários de três cavernas deste mesmo sistema, entre elas a

Santana. Posteriormente, Ayub (1998) consolidou os estudos sobre as ligações hidrogeológicas do sistema cárstico Pérolas-Santana. Outros dois estudos dignos de nota foram conduzidos na caverna de Santana: a caracterização da fácies de percolação vadosa autogênica nos salões Esther e Flores (VIANA JR., 2002); e os estudos do paleoclima por meio de espeleotemas (CRUZ JR., 2005).

Na área do turismo, destacam-se diversos estudos, sendo o trabalho de Lino (1976), provavelmente o pioneiro a se dedicar à relevância do potencial da região para o desenvolvimento do espeleoturismo. Todavia, a maioria das pesquisas sobre o tema foi produzida a partir do final dos anos de 1990, dos quais se destacam alguns trabalhos. Figueiredo (1999) estudou a dinâmica social no bairro da Serra, em Iporanga, sob a ótica da implantação das políticas públicas de conservação ambiental, considerando o turismo como vetor de desenvolvimento regional. Sgarbi (2002) desenvolveu um modelo de manejo de cavernas e aplicou parcialmente a metodologia de capacidade de carga de Cifuentes-Arias (1992) na Santana, em seu trabalho de iniciação científica. À mesma época, Scaleante (2003) desenvolveu uma pesquisa em seu mestrado sobre os impactos no espeleoclima do uso de carbureto na visitação turística da caverna – a qual veio, posteriormente, a servir de parâmetro para a proibição deste tipo de iluminação. Lobo (2004), em sua monografia de especialização, focou na percepção dos turistas acerca dos possíveis impactos ambientais existentes na caverna de Santana, decorrentes de décadas de explorações pouco controladas. As transformações no ambiente também foram tema do mestrado de Fogaça (2006), com enfoque no espaço e nos modos de vida no bairro da Serra, o principal núcleo de recepção dos turistas que vão ao PETAR. Neiman (2007) também aborda aspectos nesta mesma linha, ao analisar a mudança de atitude nas pessoas que visitam o PETAR, por meio de experimentos dirigidos e com o uso de grupos de controle, de forma a permitir a verificação da mudança efetiva de postura dos visitantes.

Quanto aos estudos atmosféricos, além da pesquisa de Scaleante (2003) e do monitoramento no salão das Flores de Viana Jr. (2002), outros dois trabalhos acadêmicos foram abrigados na caverna de Santana. O primeiro, de Alberigi (2006), que estudou o comportamento do radônio (^{222}Rn) em seu mestrado, com continuidade no doutorado (ALBERIGI, 2010). Por fim, a presente pesquisa de doutorado, entre 2007 e 2011, sobre a dinâmica espeleoclimática e suas implicações na capacidade de carga da caverna de Santana.



Capítulo 6

MATERIAIS, MÉTODOS
E ETAPAS DA PESQUISA

Uma rotina repetitiva e quase sempre solitária:
manutenção de instrumentos
e coleta de dados na caverna de Santana.
PETAR, Iporanga-SP.

6. MATERIAIS, MÉTODOS E ETAPAS DA PESQUISA

6.1. Variáveis pesquisadas

No capítulo anterior, as principais características do ambiente subterrâneo foram apresentadas, com destaque para as paisagens cársticas, a espeleogênese, os depósitos químicos secundários e o espeleoclima. A sua compreensão é fundamental para que se exponham as bases metodológicas do presente estudo, que relaciona os limites de visitação aos impactos no espeleoclima, nas rochas e espeleotemas.

Para a presente pesquisa, foram selecionados parâmetros de controle do ambiente, passíveis de aferição, monitoramento e análise dentro dos limites operacionais e temporais estabelecidos.

Os parâmetros ambientais considerados foram: chuva externa; temperatura do ar, da água e das rochas; umidade relativa do ar; fluxos de ar; concentração de gás carbônico (CO_2) e de radônio (^{222}Rn); pressão atmosférica; e os impactos físicos nos espeleotemas e rochas. No caso das rochas, optou-se pelo monitoramento de sua temperatura em superfície, e não por sonda de penetração, dado que a variação superficial depende muito mais do clima ambiente do que da temperatura interna da rocha (CIGNA; CHOPPY, 1991). Este monitoramento foi feito como subsídio à caracterização espeleoclimática e à compreensão dos processos de deposição e de

corrosão por condensação das cavernas, tal como já executado nas pesquisas de Sarbu; Lascu (1997) e Freitas; Schmekal (2006). Optou-se pelo monitoramento em superfície ao invés da perfuração em rocha, dado que a sua interação com a atmosfera cavernícola é constante (FREITAS; SCHMEKAL, 2003; CIGNA, 2004; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006a).

Dos parâmetros mencionados, receberam monitoramento contínuo a temperatura do ar, da água, das rochas e a umidade relativa do ar. O CO₂ e a pressão atmosférica foram estudados em episódios temporais periódicos, com duração variando entre três e sete dias. A chuva, o ²²²Rn e o fluxo de visitação – variável de controle para correlação de impactos ambientais – foram estudados a partir de dados secundários. Em alguns períodos, o fluxo de visitação foi monitorado em conjunto com os demais parâmetros mencionados. Os impactos da visitação foram registrados por fotomonitoramento e análise de amostras de espeleotemas. O fluxo de ar foi estudado por meio de aferições pontuais com anemômetros, testes com fumaça e inferido a partir de alguns espeleotemas, em determinados trechos da caverna. Todos estes procedimentos, além das etapas de análise e interpretação dos dados, são explicados de forma mais detalhada nas pr oximas subseções.

6.2. Procedimentos de registro e coleta

6.2.1. Monitoramento espeleoclimático

6.2.1.1. Testes preliminares de monitoramento

De forma pr evia, foram feitos alguns testes com instrumentos disponíveis para se avaliar a viabilidade e a forma de proceder com o monitoramento. Para isso, foi aproveitada a ocasião da realização de um evento musical na Gruta Morro Preto, para a comemoração dos cinquenta anos do PETAR, e um teste-piloto na caverna de Santana. Em ambos, foram utilizados termohigr metros de propriedade do Instituto do Patrim nio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) do Estado de Mato Grosso do Sul e um aferidor de CO₂ do Departamento de Bioquímica da UNESP de Rio Claro, cujas características técnicas são apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Características técnicas dos instrumentos do primeiro pré-teste

Instrumento	Fabricante	Modelo	Par�metro	Precis�o	Acur�cia
Termohigr�metro	Testo	Testostor 175	T	0,1 �C	0,2 �C
			UR	0,1%	3%
Medidor de CO ₂	G.E.	Telaire 7001	CO ₂	0,1 ppm	50 ppm

Os resultados do primeiro teste, feito na gruta do Morro Preto, foram publicados em Lobo; Zago (2009) e Lobo et al. (2009b). O segundo pré-teste foi realizado na caverna de Santana, no mês de setembro de 2008. Os termohigrômetros instalados na caverna foram programados para coletas a cada seis horas, de forma a permitir uma compreensão prévia do comportamento dos atributos espeleoclimáticos. Os resultados deste segundo pré-teste foram publicados em Lobo et al. (2009a), e são apresentados parcialmente no Capítulo 7. Os dados brutos coletados estão no APÊNDICE A.

6.2.1.2. Monitoramento contínuo

6.2.1.2.1. Monitoramento anual exploratório

A segunda fase da pesquisa, concentrada na caverna de Santana, contou com uma quantidade maior de instrumentos de aferição. Estes foram obtidos por meio de parcerias com empresas como a Instrucamp (representante comercial de diversas marcas de instrumentos de medição no Brasil) e com a Testo (fabricante de equipamentos). Com isso, obteve-se o total de instrumentos listados na Tabela 6.2, dos quais exemplos são ilustrados na Figura 6.1.

Tabela 6.2 – Características técnicas dos instrumentos do monitoramento exploratório

Instrumento	Marca/Modelo	Qt.	Memória	Variável	Precisão	Acurácia ¹
Termohigrômetro	Testo/Testostor 175	8	2.000	T	0,1 °C	0,2 °C
				UR	0,1%	3%
Termohigrômetro	Testo 175-H1	4	16.000	T	0,1 °C	0,2 °C
				UR	0,1%	2%
Termohigrômetro	Testo 177-H1	2	48.000	T	0,1 °C	0,2 °C
				UR	0,1%	0,5%
Sonda de imersão		1	-	Ta	0,1 °C	0,2 °C
Sonda de superfície		1	-	Te	0,1 °C	0,2 °C
Multifunção	Testo 435	1	10.000	Depende da sonda utilizada.		
Sonda multiparâmetro	Sonda IAQ	1	-	T	0,1 °C	0,3 °C
				UR	0,1%	2%
				PA	0,1 hPa	3 hPa
				CO ₂	0,1 ppm	50 ppm (2% do vol.)

¹ Valores divergentes do catálogo do fabricante, definidos em certificados de calibração.

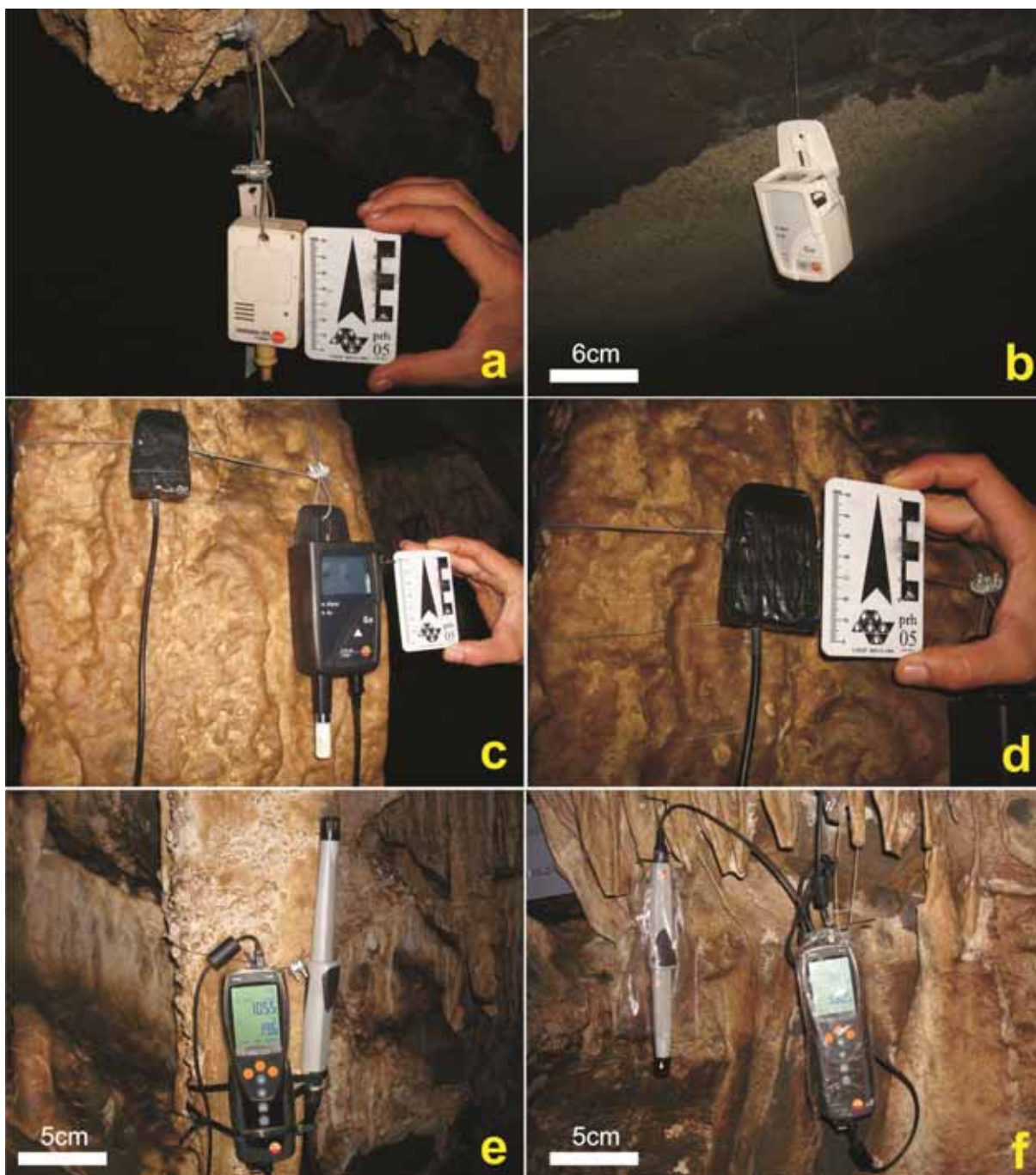


Figura 6.1 – Instrumentos utilizados na pesquisa: a) Testostor 175, fixado por meio de arame encapado e presilhas metálicas; b) Testo 175-H1, fixado com fio de *nylon* – opção de fixação que foi descartada após os testes; c) Testo 177-H1, com sonda de aferição de temperatura de superfície acoplada; d) Detalhe da proteção desenvolvida para isolar a sonda, de forma que a temperatura do ar não interferisse nas leituras de temperatura da rocha; e) Testo 435 com sonda IAQ em sua primeira montagem. A condensação na superfície do equipamento levou à alteração na posição da sonda, bem como na colocação de uma proteção plástica nela e no instrumento (e). Esta proteção foi testada, de modo que não interfere na leitura dos resultados.

Estes instrumentos foram distribuídos na caverna de Santana conforme ilustrado na Figura 6.2. Nesta nova fase, destaque para a inclusão dos parâmetros temperatura das rochas, da água, concentrações de CO_2 e pressão atmosférica, não monitorados nos pré-testes.

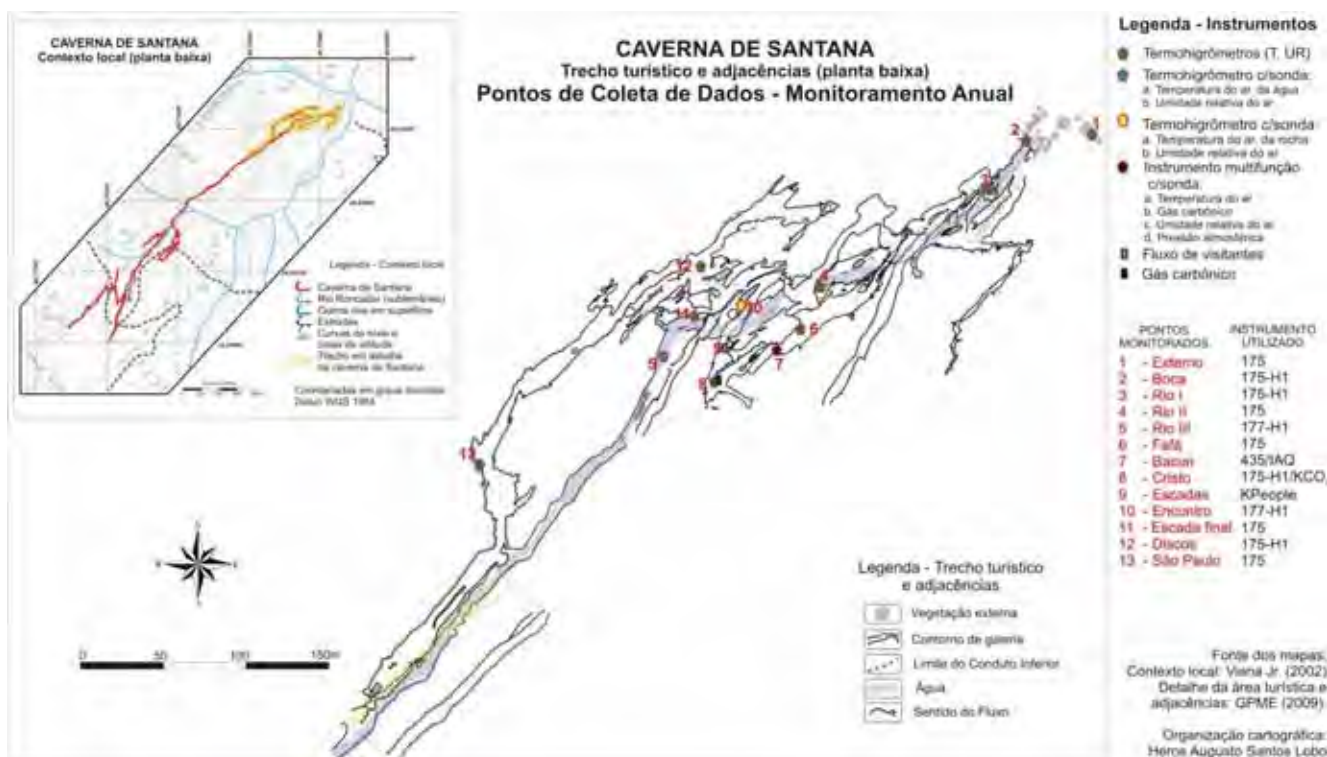


Figura 6.2 – Distribuição dos instrumentos na caverna de Santana no monitoramento exploratório anual

Para os termohigrômetros instalados na área externa da caverna, foram desenvolvidos abrigos (Figura 6.3a, b), adaptados para as condições ambientais de alta umidade e abundância de chuvas na região. Os abrigos são totalmente vazados, permitindo a circulação perfeita do ar em todas as direções, sem gerar áreas mais abafadas que poderiam interferir na leitura dos parâmetros atmosféricos e comprometer a pesquisa. Estes foram testados previamente, de forma a assegurar que não interfeririam nos resultados do monitoramento. Além dos instrumentos de aferição fixos na caverna, outros equipamentos e materiais também foram utilizados na pesquisa (Figura 6.3).



Figura 6.3 – a) Abrigo de chuva para os termohigrômetros externos; b) Ponto de instalação na ressurgência do rio Roncador; c) *Laptop*, usado para descarga de dados *in situ* e observação em gráfico dos resultados obtidos; d e e) Lacres plásticos, arames encapados e presilhas metálicas, utilizados para a fixação dos instrumentos e cabos em campo; f) Baterias ½ AA de 9V, utilizadas na maioria dos instrumentos da pesquisa.

Os instrumentos foram instalados no dia 29 de março de 2009 e o monitoramento anual exploratório foi iniciado às 0h 00min do dia 1º de abril de 2009. Foi estipulado um intervalo de aferição e coleta de 30min, totalizando 48 aferições diárias para cada variável por ponto de coleta (resultados brutos no APÊNDICE A).

Durante os primeiros meses, entre abril e setembro, diversos problemas foram enfrentados nos trabalhos de campo, a sua maioria relacionada à adaptação dos equipamentos ao ambiente subterrâneo, com saturação hídrica quase que constante, na maior parte do tempo. O problema mais recorrente foi percebido com a série de instrumentos *Testo 175-H1*, que apresentaram consumo relativamente

elevado de energia. Embora as telas de programação dos instrumentos estimassem uma vida útil das baterias superior a cem dias, na maioria dos casos estas eram consumidas em intervalos inferiores a vinte dias, o que exigiu constantes trocas de baterias e maior risco de perda de medições. Este consumo exponencial de energia, aparentemente, ocorreu em função da saturação hídrica do ar e das baixas temperaturas. Os problemas foram comentados com o representante dos instrumentos no Brasil, que propôs a sua troca pelo modelo *Testo 175-H2* (Figura 6.4a), cujas características são apresentadas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Características técnicas dos instrumentos substituídos

Instrumento	Marca/Modelo	Qtde.	Cap. de memória	Variável	Precisão	Acurácia ¹
Termohigrômetro	Testo 175-H2	4	16.000	T UR	0,1 °C 0,1%	0,1 °C 0,3%

¹ Valores divergentes do catálogo do fabricante, definidos em certificados de calibração.

Durante o desenvolvimento da pesquisa alguns instrumentos *Testostor 175* pararam de funcionar definitivamente. Neste caso, além da saturação hídrica do ambiente, atribui-se o fato ao desgaste natural do material, dado que foram adquiridos nos anos de 1990, pelo IPHAN-MS. Para substituí-los, foram obtidos dois novos instrumentos da série *Testo 175-H2*, de forma a não diminuir a densidade de pontos de coleta.

Neste mesmo período, iniciaram-se os testes com o conjunto formado pelo multifunção *Testo 435* e a *Sonda IAQ*, os quais aferem, simultaneamente, temperatura e umidade relativa do ar, CO₂ e pressão atmosférica. Em seu primeiro teste em campo, o equipamento apresentou desempenho insatisfatório, pelo alto consumo de energia. Como era de se esperar, a autonomia do instrumento seria bem menor do que os termohigrômetros, dado que seu princípio de leitura é feito por meio de raios infra-vermelhos, o que aumenta o consumo de energia. Os testes de campo apresentaram autonomia máxima inferior a 25h, inadequado para os padrões de monitoramento necessários.

A partir deste problema, foi estabelecida uma parceria com a empresa *Solbet*⁸, com sede em Campinas-SP, para a obtenção de uma solução para o consumo de energia do instrumento. O resultado foi o desenvolvimento de uma

⁸ Em fevereiro de 2010, a *Solbet* encerrou suas atividades no mercado, sendo substituída pela empresa *Ecosensor*, que continuou sendo parceira no desenvolvimento de equipamentos para esta pesquisa.

bateria de 12 v recarregável, com carga máxima de 20 A (Figura 6.4b). Com isso, a autonomia do equipamento foi ampliada para um período médio de 140h.

Além da bateria, a parceria permitiu também o desenvolvimento de mais dois instrumentos (Figura 6.4c-f): um para o CO₂ (KCO2) e outro para o registro de pessoas (KPeople). Ambos não apresentaram resultados até o término da pesquisa – exceção para uma única série de CO₂, obtida no salão do Cristo.

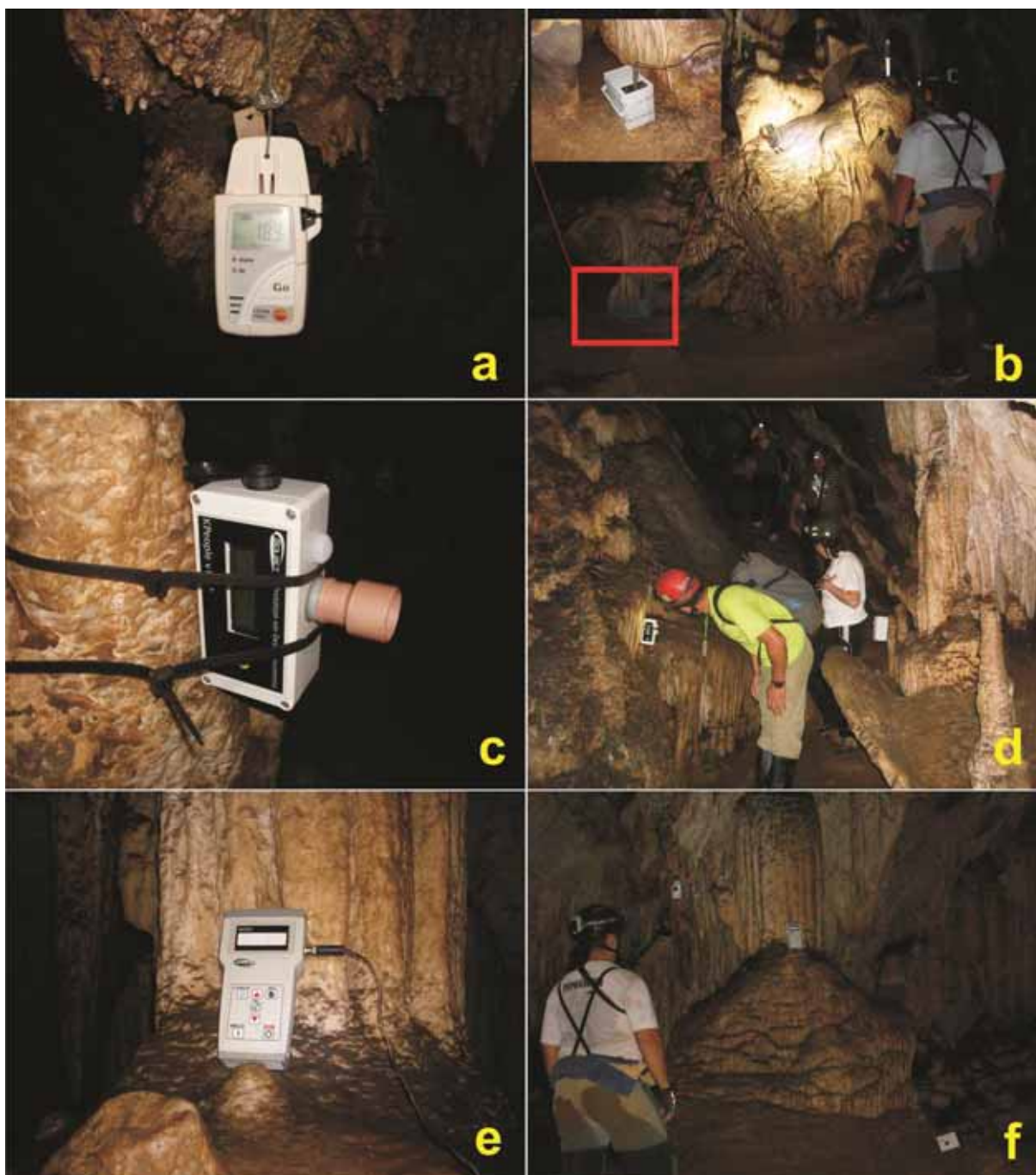


Figura 6.4 – a) Testo 175-H2; b) Bateria (detalhe) para o Testo 435 e aplicação em campo; c) contador de pessoas, com sua aplicação em campo (d); e e) aferidor de CO₂, com aplicação em campo (f)

Neste monitoramento anual exploratório, o grande problema enfrentado foi a saturação hídrica do ambiente e o intenso período de chuvas, que gerou diversos alagamentos na galeria do rio e galerias superiores da caverna de Santana. Em diversos momentos a caverna apresentou condensação de água no ar, nas rochas e nos instrumentos (Figura 6.5). Esta condição dificultou a coleta de dados dos instrumentos, que é feita por uma interface que utiliza o infravermelho como princípio de comunicação. O que se percebeu é que em índices de UR superiores a 80% o sistema de comunicação por infravermelho começa a apresentar problemas, deixando de funcionar em algumas vezes. Além disso, foram também testados alguns dispositivos de comunicação com base em sistemas sem fio com o uso de *bluetooth*, o que também se mostrou inviável, provavelmente pelo mesmo motivo.

As constantes inundações na galeria do rio entre os meses de novembro de 2009 e março de 2010 também prejudicaram um dos termohigrômetros (estação Rio III), que chegou a ser atingido pela água, apesar de estar instalado em um ponto da galeria rente ao teto. Grande parte dos dados registrados foi perdida, mas o instrumento foi posteriormente recuperado.

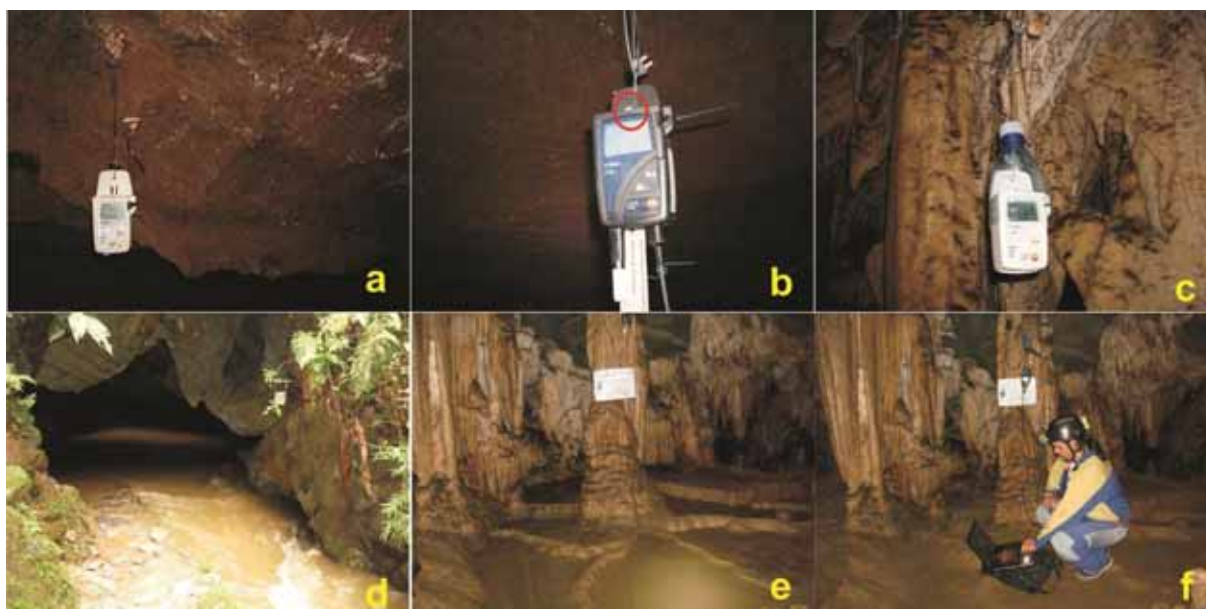


Figura 6.5 – Episódios gerados pelo excesso de umidade e enchentes na caverna de Santana. a) condensação no teto e no instrumento (estação Rio I); b) condensação de água no interior do visor e com fungos se desenvolvendo na caixa de proteção do instrumento (círculo vermelho); c) nos pontos com gotejamento, os problemas de excesso de umidade foram resolvidos com abrigos improvisados com garrafas PET cortadas, sem encobrir o sensor de leitura; d) rio Roncador com nível d'água 60 cm acima do habitual (6 mar. 2010, às 12h 50min); e) alagamento excepcional do salão do Encontro (7 fev. 2010, às 16h 55min). A foto f ilustra o mesmo salão em condições habituais. Foto f: Tatiane V. Barbosa.

6.2.1.2.2. Monitoramento trimestral em escala de detalhe

A terceira fase do monitoramento teve seu início às 0h 00min do dia 26 de junho de 2010. Para esta fase, foram mantidos os instrumentos Testo 175-H2 (seis unidades), 177-H1 (duas unidades, uma com sonda para temperatura de superfície e outra para imersão) e o conjunto 435 e Sonda IAQ. Além destes, foi adquirido um novo instrumento, 177-T2, com leitura de temperatura em três canais: um interno e dois por sonda. Suas características técnicas são apresentadas na Tabela 6.4. A distribuição de todos os instrumentos utilizados é exibida na Figura 6.6.

Tabela 6.4 – Características técnicas dos instrumentos substituídos

Instrumento	Marca/Modelo	Qtde.	Cap. de memória	Variável	Precisão	Acurácia ¹
Termoregistrador	Testo 177-T2	1	48.000	T	0,1 °C	0,1 °C

¹ Valores divergentes do catálogo do fabricante, definidos em certificados de calibração.

Para este monitoramento final, o intervalo de aferição foi reduzido para 20min, de forma a agregar mais detalhe ao estudo. Esta opção foi tomada para uma melhor compreensão do tempo de estabilização do ambiente quando da ocorrência de impactos antrópicos nos parâmetros atmosféricos. Os dados brutos desta fase se encontram no APÊNDICE A.

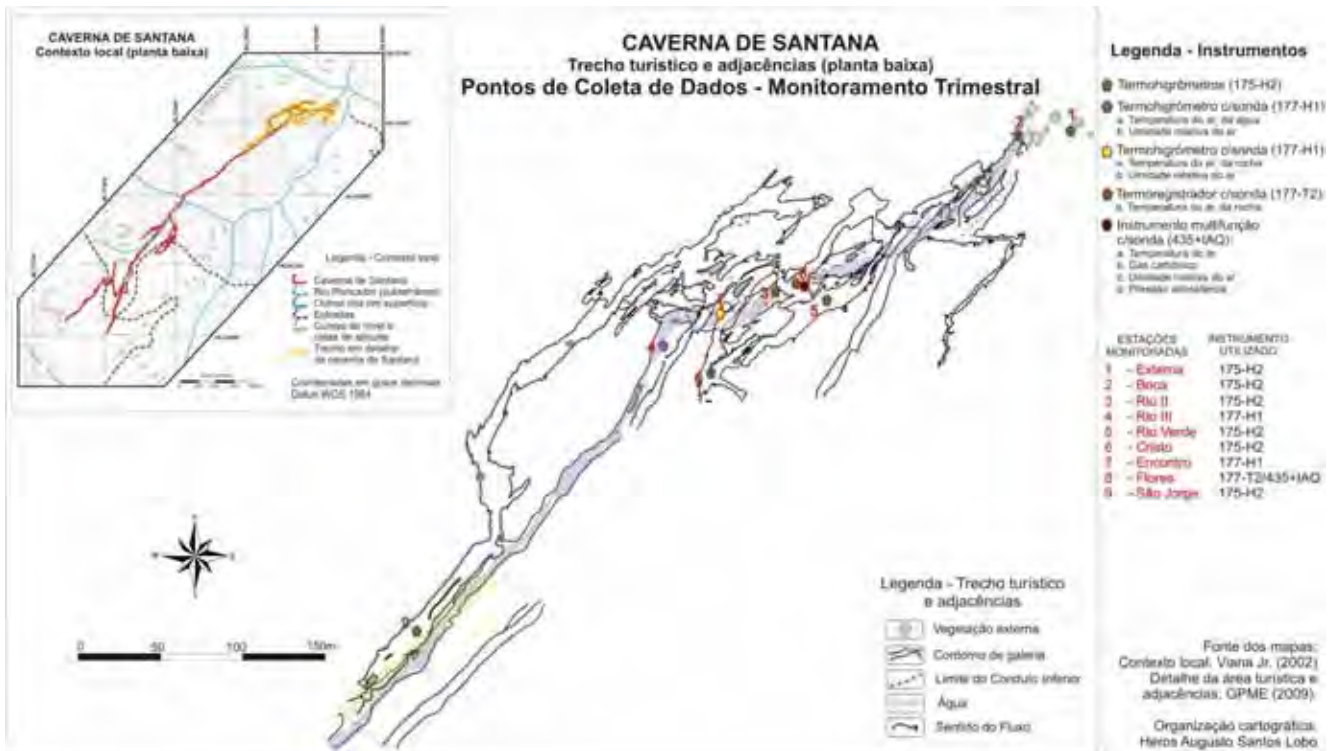


Figura 6.6 – Distribuição dos instrumentos na caverna de Santana para o monitoramento final

Os problemas gerados pela saturação hídrica voltaram a ocorrer nesta fase da pesquisa. Os instrumentos instalados nas estações São Jorge e Flores pararam de funcionar durante o monitoramento. O laudo da assistência técnica do fabricante apontou a existência de alto nível de oxidação em componentes da placa mãe do instrumento da estação São Jorge, inutilizando-o por completo. O instrumento da estação Flores, embora tenha sido recolhido com danos aparentes em sua carcaça (Figura 6.7a), voltou a funcionar posteriormente. Outro problema encontrado nesta fase foi com o instrumento instalado na estação Encontro, que foi depredado em ato de vandalismo (Figura 6.7b), tendo seus sensores arrancados, inutilizando-o definitivamente. Outro instrumento que foi alvo de depredação foi o contador de pessoas, que teve parte de seu direcionador de raios infra-vermelhos arrancado (Figura 6.7c). Estes foram os únicos problemas confirmados de vandalismo nos instrumentos instalados na caverna de Santana durante a pesquisa.

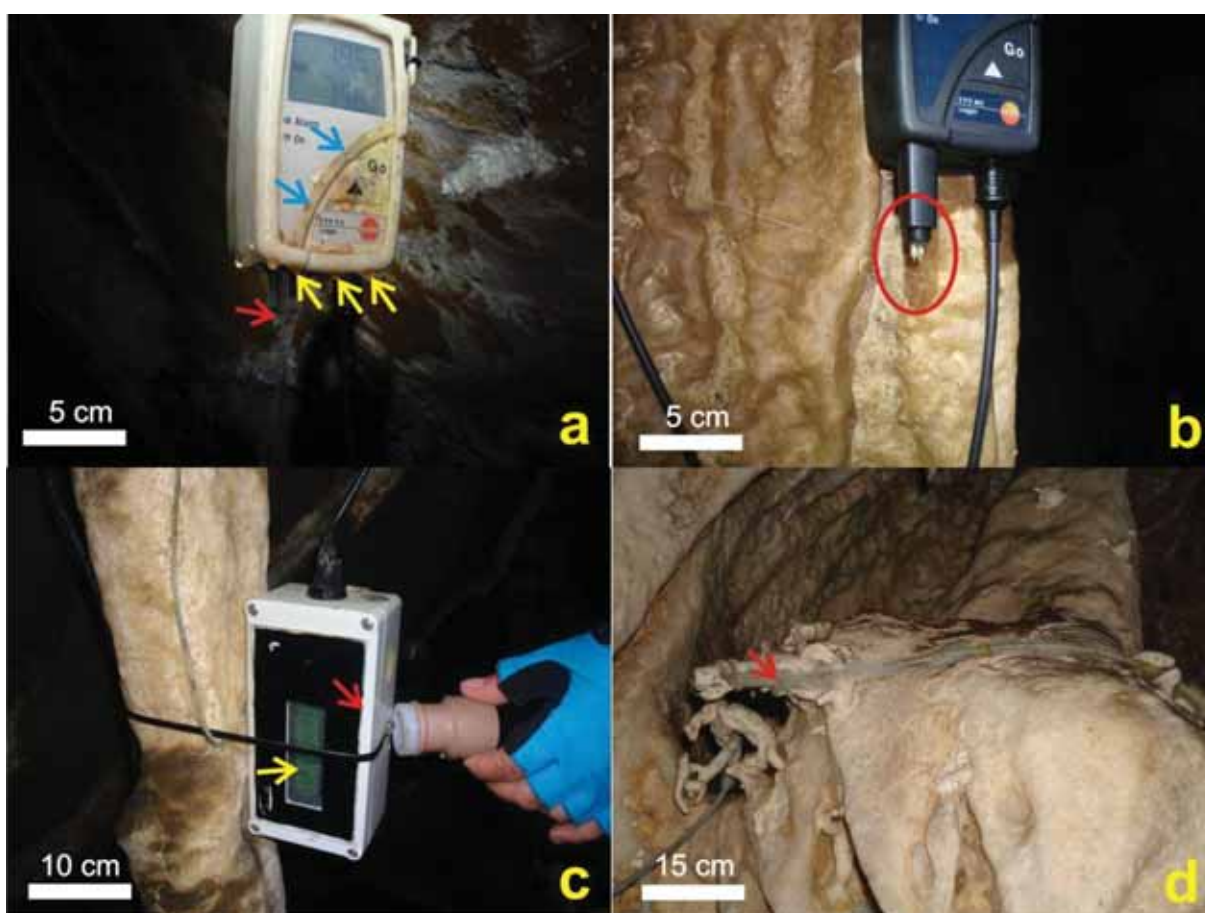


Figura 6.7 – a) 177-T2 instalado no salão das Flores, com formação de borbulhas na carcaça (azul), gotículas de condensação de cor escura (amarelo) e formação de fungos no cabo (vermelho); b) 177-H1, no salão do Encontro, com capa protetora e sensores arrancados; c) contador de pessoas, com colimador arrancado (vermelho) e condensação de água no interior do instrumento (amarelo); d) fato constante na pesquisa: formação de fungos em cabos que foram manuseados, provavelmente em função da liberação de partículas orgânicas na mão associada à saturação hídrica do ambiente

6.2.1.3. Perfis atmosféricos

A densidade dos pontos de monitoramento utilizados na presente pesquisa – variável entre seis e 13, conforme a fase de desenvolvimento – é relativamente satisfatória para uma compreensão dos padrões sazonais de variabilidade e dos impactos gerados pela visitação. Pesquisas do gênero se baseiam em redes menos complexas, com variação entre dois e seis pontos de monitoramento, conforme observado em Villar et al. (1984a, b), Hoyos et al. (1998), Buecher (1999), Sánchez-Moral et al. (1999), Cigna (2002a, b), Calaforra et al. (2003) e Fernández-Cortés et al. (2006a, b, c), entre muitos outros trabalhos consultados. A única exceção encontrada foi no trabalho de Boch et al. (2011), que utilizaram uma rede de 11 pontos de monitoramento de temperatura em uma caverna da Áustria. Para complementar a densidade espacial relativamente baixa da pesquisa, adotou-se um procedimento amostral complementar, a realização de perfis atmosféricos, a exemplo dos trabalhos de Fernández-Cortés et al. (2006c) e de Milanolo; Grabrovsek (2009).

A perfilagem atmosférica permite a geoespacialização dos resultados, por meio de procedimentos de interpolação de dados, gerando com isto um episódio espacialmente delimitado e temporalmente variável. A variação temporal depende tanto do tempo de coleta de cada variável quanto da quantidade de pontos pré-estabelecidos. Na caverna de Santana, foram estabelecidos 75 pontos de coleta (Figura 6.8), considerando as variáveis temperatura e umidade relativa do ar, CO₂ e pressão atmosférica. Com estas características, a realização de cada perfil na caverna de Santana durou aproximadamente 8h.



Figura 6.8 – Distribuição dos pontos de perfilagem atmosférica na caverna de Santana

Foram realizados dois perfis espaço-temporais multivariados na caverna de Santana, sendo um em abril de 2010 e outro em Janeiro de 2011. Os dados brutos destes perfis são apresentados no APÊNDICE A.

6.2.2. Circulação atmosférica e concentração gasosa

A circulação de ar dentro da caverna também foi registrada, por se tratar de parâmetro importante para a compreensão dos processos de acúmulo e dispersão gasosa. Para tanto, foram feitos testes com anemômetros de conchas, os quais se mostraram pouco eficientes, dado que em raros casos foram encontrados fluxos de ar com força suficiente para movimentar as conchas. Este fato só ocorreu na região da ressurgência do rio Roncador (entrada da caverna), zona de maior troca gasosa.

Para o registro de fluxo em outras áreas foi utilizada fumaça, tal como realizado por Fernández-Cortés et al. (2006b) na cueva del Agua, Espanha. Esta foi produzida a partir de palitos de fósforo umedecidos, que produziam apenas fumaça ao invés de fogo. Outra técnica de observação, funcional em alguns trechos da caverna, foi a constatação visual da direção das gotículas de condensação de água no ar, observada no contra-luz das lanternas.

Para o conhecimento dos padrões predominantes de circulação, foram analisadas a presença, a localização e a posição de tipos específicos de espeleotemas que crescem orientados segundo o fluxo de ar no interior da caverna, como os coralóides. Conforme os trabalhos de Hill; Forti (1997), Palmer (2007), Queen (2009) e Self (2009), o fluxo de ar gera um ressecamento local mais rápido em um lado da superfície de um espeleotema já existente, como por exemplo, uma estalactite. Com isso, ocorre evaporação local, com liberação de CO_2 e deposição de CaCO_3 , formando os coralóides e outros espeleotemas.

6.2.3. Pluviosidade

Para a pluviosidade externa não foram feitas medições diretas na presente pesquisa. Ao invés disto, foram utilizados dados do Instituto Agrônomo de Campinas, considerando as séries históricas de monitoramento climático na região; e da pesquisa do prof. Dr. José Antônio Ferrari⁹, cujo trabalho de monitoramento da drenagem subterrânea na região inclui um monitoramento da chuva diária.

⁹ FERRARI, J.A. **A dinâmica da drenagem subterrânea nos planaltos cársticos do rio Betari, Vale do Ribeira – SP.** Projeto Fapesp 2009/05115-5. São Paulo, 2009.

6.2.4. Fotomonitoramento

O fotomonitoramento foi utilizado para o registro dos impactos e danos ambientais pré-existentes na caverna, muito provavelmente originados pela visitação turística. Dentre eles, pode-se destacar: partes das paredes dos condutos quebradas para o alargamento de passagens; espeleotemas pisoteados; espeleotemas e rochas desgastados pelo contato manual; pichações; e áreas escurecidas em espeleotemas.

6.2.5. Amostras de rochas e depósitos químicos secundários

No mês de março de 2011, foram coletadas 11 amostras de rochas e de espeleotemas (autorização de coleta no ANEXO, em conjunto com a autorização para o desenvolvimento da pesquisa), levando-se em conta a premissa de não trazer prejuízos estéticos para os locais pesquisados. A seleção das amostras tomou como critérios a necessidade de coleta:

- Em trechos aparentemente afetados pela suposta deposição de fuligem originada na queima do acetileno nas carbureteiras
- Tanto em áreas turísticas quanto em galerias pouco visitadas, para estabelecer comparações
- De espeleotemas de mesmo tipo, semelhantes entre si em suas dimensões e localização relativa na caverna.

A Figura 6.9 ilustra a localização dos pontos de coleta de amostras de rochas na caverna de Santana, com uma breve descrição no Quadro 6.1. Além disso, foram preparadas amostras de humo, o qual foi gerado a partir da exposição direta de lâminas de vidro à chama da queima do acetileno em carbureteira, por um tempo mínimo de 5 minutos.

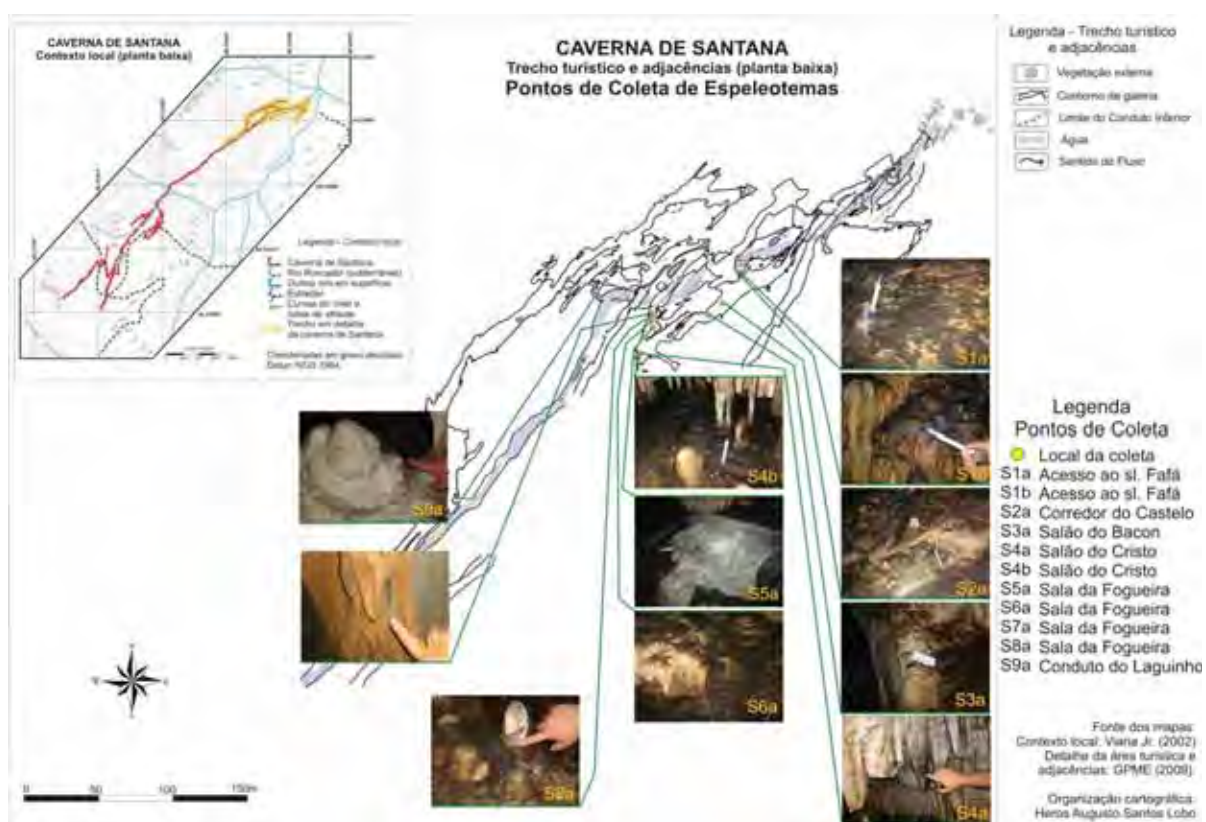


Figura 6.9 – Localização dos pontos de coleta de amostras de espeleotemas na caverna de Santana

Quadro 6.1 – Descrição das amostras de rochas coletadas na caverna de Santana

Ponto de Coleta	Código da Amostra	Tipo de Amostra	Descrição
Acesso ao Fafá	S1a; S1b	Crostas calcíticas	Fuligem preta nos espeleotemas, facilmente desagregável, desprende com o tato. Deposição da fuligem obedece ao sentido gravitacional, se depositando apenas nas partes baixas da caverna e/ou diagonais e horizontais nas paredes. Teto e paredes mais verticais estão limpos.
Corredor do Castelo	S2a	Crostas calcíticas	Idem S1.
Bacon	S3a	Estalagmite com coralóide e crosta calcítica	Estalagmite localizada na parede a aprox. 1,5 m do chão, com coralóides em uma das laterais. Conjunto todo recoberto por crostas calcíticas e fuligem preta. Laminação visível.
Cristo	S4a	Cortina	Cortina localizada no teto, no ponto de visualização do espeleotema conhecido como “Cristo”. Aparência de queimadura por chama de carbureteira (chamuscado).
	S4b	Placas calcíticas	Placas calcíticas (cortinas quebradas e calcificadas?) na base do conduto de visualização do espeleotema “Cristo”. Deposição de fuligem preta no espeleotema.
Sala da Fogueira – topo	S5a	Travertino ativo	Pedaço da parede de um travertino ativo, evidenciando duas situações distintas: parte preta com deposição de fuligem; parte branca, aparentemente constituída de calcita sem contaminação externa.
Sala da Fogueira – Meio da galeria	S6a	Crosta calcítica	Idem S1. Coleta de maior quantidade para realização de análise química.
Sala da Fogueira – parede	S7a	Estalactite e cortina	Pequeno conjunto de estalactite e cortina vermelhos, para identificação de provável mineralogia diferenciada.
Sala da Fogueira – base	S8a	Estalagmite	Estalagmite localizada no chão, recoberta de crosta de fuligem preta.
Conduto do laguinho	S9a	Estalagmite com crostas calcíticas	Estalagmite sobreposta por crostas calcíticas, de coloração totalmente branca, indicando possível inexistência de contaminação externa.

6.3. Tratamento dos dados coletados

Os dados espeleoclimáticos coletados foram armazenados em tabelas do aplicativo *Excel for Windows*. Para cada variável, foram gerados, em média, 1.440 registros mensais, considerando a coleta a cada 30min e 2.160 registros para o intervalo de 20min. Estes dados se multiplicam pelo número de pontos de coleta dentro da caverna e por, no mínimo, duas variáveis em cada ponto.

O volume de dados gerado por este padrão de coleta teve que passar por alguns procedimentos de tratamento, para sua verificação e posterior validação. Foram preliminarmente descartados dados discrepantes, gerados, por exemplo, no início ou final de cada série, quando os instrumentos ainda não haviam se estabilizado no ambiente da caverna. Dados anômalos, gerados durante a manipulação dos instrumentos em campo, para transferência de registros ou manutenção periódica, também foram desconsiderados. Para isso, todos os procedimentos de manutenção e descarga de dados eram anotados em caderneta, com horário de início e fim dos procedimentos.

Para alguns procedimentos de análise estatística foram utilizadas as séries originais de dados coletados. Para outros, optou-se por gerar simplificações diárias de cada variável para cada ponto amostrado, considerando a tendência central e a variabilidade dos dados. Este procedimento foi adotado para as análises preliminares do sistema atmosférico mensurado, de forma a identificar padrões habituais para os dados aferidos. Em alguns casos, análises de detalhe foram realizadas para a correlação de fenômenos aferidos em uma determinada variável com o comportamento de outras variáveis, buscando identificar explicações e efeitos denexo causal, sobretudo em relação à presença humana nas cavernas. Estes procedimentos são mais bem explicados nas subseções seguintes, com o detalhamento das técnicas estatísticas utilizadas para a análise dos dados.

6.4. Análise dos dados

6.4.1. Análise dos dados atmosféricos por estação de monitoramento

O primeiro conjunto de análises aplicado foi a estatística descritiva. Por meio dela, foram obtidas medidas de tendência central – média, moda e mediana – e de variabilidade – amplitude, desvio padrão e variância – para cada série diária, mensal e anual de dados. Este procedimento permitiu uma primeira compreensão do

sistema atmosférico estudado, bem como a obtenção das simplificações necessárias para as análises estatísticas subsequentes.

Optou-se pelo uso da moda como principal medida de tendência central para a análise. Isto porque as séries de dados obtidas possuem grande intensidade diária de repetição, permitindo a identificação, ainda que simplificada, do padrão habitual de variabilidade de cada parâmetro aferido.

A opção de se trabalhar com a moda se deu também porque, conforme Gerardi; Silva (1981), trata-se de uma medida eficiente para a apresentação gráfica dos dados. A média, por sua vez, foi preterida por apresentar desvantagens em séries assimétricas de dados (GERARDI; SILVA, 1981) – como é o caso dos pontos externos de monitoramento –, apesar de ser matematicamente fundamentada.

Para as medidas de variabilidade, foi utilizada prioritariamente a amplitude, com ênfase gráfica nas máximas diárias. Em casos específicos, quando da constatação de elevação pontual das máximas em dissonância de um padrão habitual de determinado ponto de coleta, análises de estatística descritiva, com o apoio de gráficos, foram feitas em detalhe, para a tentativa de constatação de correlação com outras variáveis estudadas. Outro procedimento utilizado para a verificação dos padrões de variabilidade de cada parâmetro em cada ponto de coleta foi o gráfico de linha da frequência relativa de ocorrência de valores de temperatura. Este procedimento não foi repetido para a umidade relativa do ar, dado que, na maioria dos casos, os valores aferidos eram constantes em 99,9%.

A análise dos parâmetros espeleoclimáticos foi realizada também por meio de procedimentos estatísticos para séries temporais. Este tipo de análise é bastante usual tanto em trabalhos de hidrogeologia (e.g. MANGIN, 1984; LAROCQUE et al., 1998; MANGIN et al., 1999; FERRARI; KARMANN, 2008) e de climatologia (e.g. CALAFORRA et al., 2003; FERNÁNDEZ-CORTÉS, 2004; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006a, b, c).

Uma série temporal é um arranjo quantitativo de um conjunto de dados ordenados de forma cronológica. A ideia básica da organização dos dados em função do tempo parte do princípio de que é possível decompor as séries temporais em um número finito de componentes independentes e não observáveis diretamente, que podem ser calculados antecipadamente. A condição para tanto é a existência de diferentes fatores independentes que interfiram na variável em questão (KIRCHGÄSSNER; WOLTERS, 2007). Outra característica deste tipo de análise,

presente em dados atmosféricos, é sua baixa linearidade, apoiada em princípios de sistemas caóticos, onde uma alteração de qualquer magnitude em apenas uma variável pode alterar todo o modelo desenvolvido (STORCH; ZWIERS, 1999; WILKS, 2006). Por conta desta característica, a estatística de séries temporais é uma ferramenta fundamental para as análises climatológicas, dado que, em climatologia, apenas uma pequena proporção dos fatores que controlam as suas variações são considerados nos modelos matemáticos de análise, enquanto que os demais são interpretados de forma indireta (STORCH; ZWIERS, 1999).

As análises estatísticas de séries temporais se iniciaram com procedimentos de suavização, bastante úteis para a identificação de padrões e anomalias nos dados originais. Para tanto, foi utilizada a média móvel, a qual é regida pelo modelo apresentado na Equação 6.1:

$$\begin{cases} y_t = \mu_t + \varepsilon_t \\ \mu_t = \frac{\sum_{i=-q}^{q-l} w_i Y_{t+i}}{\sum_{i=-q}^{q-l} w_i} \end{cases} \quad (6.1)$$

Onde l é uma constante que, quando equivale a zero, permite a predição de dependência dos valores prévios de q e do valor corrente. Se l equivale a um, a predição depende também dos próximos valores de q . Os pesos são determinados por w_i ($i=1\dots q$), podendo ser constantes e pré-determinados ou baseados em valores ótimos para cada possibilidade de aplicação (XLSTAT, 2009).

Além dos gráficos com a suavização das médias móveis, nos casos de maiores discrepâncias em relação às séries originais foram gerados gráficos de resíduos.

As análises também foram feitas por meio de duas funções temporais: a autocorrelação e a densidade espectral. A autocorrelação quantifica a relação de dependência linear de sucessivos valores em um intervalo de tempo. O seu produto, o correlograma, é a representação gráfica do efeito de memória do sistema analisado. Se um determinado evento possui uma influência temporal de longo prazo, a inclinação da função de autocorrelação decresce lentamente (LAROCQUE et al., 1998). O modelo da autocorrelação é dado pelas equações 6.2 e 6.3.

$$r(k) = \frac{C(k)}{C(0)} \quad (6.2)$$

$$C(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad (6.3)$$

Onde k é o intervalo de tempo ($k = 0$ para m), n é o comprimento da série temporal, x é um único registro, \bar{x} é a média dos registros e m é o ponto de corte. O ponto de corte determina o intervalo em que a análise pode ser realizada e é usualmente selecionado para circunscrever um comportamento dado, como os efeitos anuais ou de longo termo (LAROCQUE et al., 1998). 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), valor este também utilizado por Calaforra et al. (2003) e Ferrari; Karmann (2008).

A autocorrelação é 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. A interpretação da função de densidade espectral, por meio da identificação de diferentes picos representando fenômenos periódicos, permite a caracterização do sistema (Equações 6.4 e 6.5):

$$S(f) = 2[1 + 2 \sum_{k=1}^m D(k)r(k) \cos(2\pi fk)] \quad (6.4)$$

$$D(k) = \frac{(1 + \cos \pi \frac{k}{m})}{2} \quad (6.5)$$

Onde $f = j/2m$, sendo $j = 1$ para m , f é a frequência e $D(k)$ assegura que os valores estimados para $S(D)$ não sejam tendenciosos, por meio do filtro de Turkey da Equação 6.5 (LAROCQUE et al., 1998) – o qual é recomendado por Mangin (1984) e já foi testado com sucesso por Calaforra et al. (2003). A função da densidade espectral também determina o tempo de regulação (Treg) (Equação 6.6):

$$T_{reg} = \frac{S(f=0)}{2} \quad (6.6)$$

O tempo de regulação define a duração da influência do sinal de saída e fornece uma indicação da amplitude do impulso de resposta do sistema (LAROCQUE et al., 1998).

6.4.2. Análise estatística da dinâmica atmosférica subterrânea

Em um segundo momento, a análise dos dados foi aplicada visando a integração das variáveis analisadas entre as diversas estações de monitoramento, além dos dados originados por outros procedimentos de coleta. Para tanto, foram

utilizados histogramas de frequência, coeficientes de correlação r de Pearson, correlação cruzada e análises de *clusters*, ou agrupamentos.

Os histogramas de frequência, bem como a relação entre duas ou mais variáveis, foram analisados por meio de gráficos, permitindo a interpretação da correlação visual entre os dados. Este procedimento foi utilizado, na maioria dos casos, em conjunto com os coeficientes de correlação de Pearson, que indica o grau de associação linear entre variáveis distintas (GERARDI; SILVA, 1981). Seu modelo se expressa da forma apresentada na Equação 6.7.

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (6.7)$$

Onde x_i e y_i representam os respectivos desvios de x e y ($x_i - \bar{x}$) e ($y_i - \bar{y}$). O resultado para r pode variar entre +1 e -1, dado que $r = +1$ indica uma perfeita associação positiva; $r = -1$, uma perfeita associação negativa; $r = 0$, ausência de correlação (GERARDI; SILVA, 1981). Este procedimento já foi utilizado para análises de séries de dados espeleoclimáticos, em trabalhos como: Freitas; Schmekal (2003, 2006), para taxas de condensação de água nas paredes; e Liñán et al. (2008), para análises de concentração de CO₂ no ar.

Por meio da correlação 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.

Outro procedimento de análise utilizado foi a correlação cruzada (Equações 6.8 e 6.9):

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (6.8)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad (6.9)$$

Onde $C_{xy}(k)$ é o correlograma cruzado, os desvios das séries temporais são dados por σ_x e σ_y e o índice k determina o deslocamento entre as séries para calcular a correlação (FERRARI; KARMANN, 2008).

A análise de agrupamentos foi utilizada na discussão sobre zoneamento espeleoclimático, que partiu de conceitos já publicados por Stoeva; 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, onde o zoneamento ecológico e climático possui bases sólidas já construídas. Exemplos que influenciaram a análise realizada foram encontrados em Khan; Kim (1998) e Cardoso; 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; Silva (1981) e Landim (2003), a análise de agrupamentos tem 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.

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 que o método Ward é bastante eficiente na definição da quantidade de agrupamentos a serem utilizados.

Os procedimentos estatísticos variados e multivariados foram executados por meio do pacote estatístico do XLStat[®], um aplicativo que funciona como suplemento do Excel[®] for Windows[®].

6.4.3. Estatística geoespacializada no perfil atmosférico espaço-temporal

Esta técnica de análise foi utilizada nos dados de perfilagem atmosférica, com o uso do aplicativo Surfer[®]. Os dados coletados foram interpolados por meio de três algoritmos, a título de teste: triangulação linear; superfícies de tendência (3ª à 5ª ordem) e krigagem ordinária. Destes, os que apresentaram os resultados mais coerentes e melhor ajuste à realidade espacial da caverna de Santana foram a superfície de tendência de segunda ordem para a temperatura (Equação 6.10) e a triangulação linear para a pressão atmosférica e o gás carbônico (Equação 6.11).

$$z_i(X, Y) = [a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4x_iy_i + a_5y_i^2 + \dots] + e_i(x_i, y_i) \quad (6.10)$$

$$Z^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_i \quad (6.11)$$

Na superfície de tendência, $z_i (X, Y)$ é a variável mapeada, em função das variáveis x_i e y_i , e onde e_i representa a fonte não sistemática de variação, os resíduos (LANDIM, 2003). Na triangulação linear, o valor de um ponto predito Z^* corresponde à somatória dos produtos entre os valores obtidos das variáveis em pontos conhecidos Z_i e os respectivos pesos calculados λ_i para cada ponto i , variando de 1 até N (LANDIM et al., 2002).

As superfícies de tendência permitem a identificação de pequenas flutuações locais, que por vezes, podem ser mascaradas por padrões mais regionais (LANDIM, 2003). As vantagens no uso da triangulação linear são sua fidelidade e eficiência para uma visualização rápida dos dados. Além disso, ela é recomendada por Landim (2000) quando os valores estimados são necessários apenas dentro da área amostrada. Esta característica é de grande utilidade em cavernas, onde o confinamento espacial se configura como um limitante natural para os resultados da interpolação. Em teste anterior (LOBO; ZAGO, 2010) na gruna do Penhasco, em Buritinópolis-GO, esta questão não foi enfrentada, dado que a caverna é formada por um grande salão único, diferente da caverna de Santana, composta por uma rede de galerias dentríticas e labirínticas em diversos estratos verticais.

6.4.4. Análise das amostras de espeleotemas

As amostras de espeleotemas foram analisadas no Instituto de Geociências da USP, nos laboratórios de petrografia sedimentar (LABPETRO), de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de Química e ICP/OES.

A petrografia foi feita em lupa, modelo Zeiss® SV 11, acoplada em uma câmera CCD Sony® *color video* e com uso do analisador de imagens Leica® QWIN® 550. Foram utilizados aumentos variáveis entre 6x e 66x, conforme os aspectos a serem ressaltados em cada amostra.

Para a realização da microscopia eletrônica de varredura, as amostras foram coladas em *pin-stubs* de liga de Al-Cu, com uso de uma cola condutora de carbono *Leit-C*. Posteriormente, as amostras foram recobertas pelo método *Sputter-coating*, com ouro (Au). Para a análise, foi utilizado um MEV Leo® 440, com espectrômetro de energia dispersiva de raio-X e detector de estado sólido de Si. As condições de trabalho foram de 25 mm e corrente de sonda igual à 1 nA para os aumentos baixos

e de 18 mm e 500 pA para os médios. A tensão de aceleração foi de 20.000v e a pressão de alto vácuo foi maior que $9,38 \times 10^{-5}$ torr.

As eletromicrografias foram realizadas com detector de elétrons secundários para a topografia das amostras e de elétrons retroespalhados para evidenciar a diferença de número atômico médio entre as regiões. As regiões mais claras apresentam números atômicos médios maiores.

As análises químicas das amostras de rochas foram feitas conforme procedimentos analíticos propostos por Andrade et al. (2009). As amostras foram submetidas a ataque com HCl 3% à frio, para eliminação de carbonatos. Decorridas 12 horas de contato com o ácido, a solução foi filtrada a vácuo e lavada com água deionizada até a total eliminação de íons cloreto. Em seguida, a amostra foi seca em estufa a 100 °C, por 24h. A análise de Carbono foi realizada no resíduo obtido após a secagem em estufa. Foram utilizados como materiais de referência (SDO-1 e SCo-1) sedimentos com matéria orgânica da USGS (EUA).

6.5. Interpretação dos dados

A interpretação das análises dos dados tomou por base a pesquisa bibliográfica realizada, sobretudo no que diz respeito ao nexos causal entre as alterações nos padrões de variabilidade temporal e espacial dos dados aferidos e nas possíveis consequências destes impactos no meio físico. Nesse sentido, os trabalhos de Villar et al. (1984a, b), Pulido-Bosch et al. (1997), Hoyos et al. (1998), Sánchez-Martos et al. (1999), Calaforra et al. (2003) e Fernández-Cortés (2006a, b) apresentaram as principais influências metodológicas para as interpretações obtidas.

Também foram fundamentais as análises da circulação atmosférica de energia e massa, com base em Cigna (1967, 2004), Racovita (1975), Heaton (1986), Mangin; Andrieux (1988), Bourges et al. (2001), Badino (2004), Stoeva; Stoev (2005), Fernández-Cortés et al. (2006b) e Liñán et al. (2008).

A partir destas primeiras interpretações, foram desenvolvidas as discussões para a identificação de uma metodologia alternativa de controle de visitação, denominada de capacidade de carga espeleoturística. A base utilizada para tanto partiu dos trabalhos de Villar et al. (1984a, b), Cigna; Forti (1988), Cifuentes-Arias (1992), Cigna (1993), Hoyos et al. (1998), Cifuentes-Arias et al. (1999), Sánchez-Moral et al. (1999), Calaforra et al. (2003), Fernández-Cortés et al. (2006a), Boggiani et al. (2007) e Lobo (2005, 2008b).



Capítulo 7 RESULTADOS

Indicação de temperatura do ar e condensação de água em termohigrômetro, evidenciando a alta umidade relativa e o choque térmico entre massas de ar. Caverna de Santana, PETAR, Iporanga-SP.

7. RESULTADOS

7.1. Apresentação

Os resultados das pesquisas de campo são apresentados com vistas ao conhecimento da dinâmica atmosférica subterrânea e os possíveis impactos da visitação. Esta dinâmica e seus processos naturais são o ponto de partida para o estabelecimento de limites de uso dos ambientes subterrâneos, a partir da análise de um sinal de entrada externo ao sistema analisado, a presença humana, e da compreensão dos produtos resultantes desta interferência.

Os dados apresentados correspondem: a) à caracterização do espeleoclima; b) aos perfis espaço-temporais higrotérmicos, de gás carbônico e da pressão atmosférica; c) aos monitoramentos pontuais de concentração de CO₂; d) às aferições e inferências de circulação atmosférica, por meio de instrumentos e da posição de espeleotemas; e) à compreensão da dinâmica atmosférica da caverna de Santana; e f) às análises das amostras de espeleotemas coletadas na caverna.

Para melhor organização dos resultados, exposição dos fatos e fenômenos observados, bem como suporte às futuras discussões e conclusões, os dados de monitoramento espeleoclimático serão apresentados, em um primeiro momento, divididos nas duas principais fases da pesquisa, o monitoramento anual e o monitoramento trimestral em detalhe. A exposição dos resultados foi organizada a

partir das zonas termoclimáticas obtidas durante os pré-testes da pesquisa, cujos resultados foram publicados em Lobo et al. (2009a):

- *Zona Externa*, com uma estação de monitoramento higrotérmico (Externa) e os dados de chuva regional
- *Zona Transicional*, com duas estações de monitoramento higrotérmico (Boca e Rio I)
- *Zona Interna Típica*, com duas estações de monitoramento higrotérmico (Rio II e III) acrescidas do monitoramento da temperatura da água do rio Roncador
- *Zona de Baixa Amplitude Térmica*, com cinco estações de monitoramento higrotérmico (Fafá, Rio Verde, Cristo, Encontro e Escada) acrescidas do monitoramento da temperatura superficial da rocha no salão do Encontro
- *Zona de Temperatura Estável*, com três estações de monitoramento higrotérmico (Discos, São Paulo e São Jorge).

Cabe ressaltar que tais zonas não são espacialmente precisas, podendo variar principalmente nos trechos de transição. Assim, a sua interpretação literal deve ser tomada com cautela.

Sobre as estações de monitoramento mencionadas nos tópicos acima, cabe ressaltar que algumas delas foram usadas apenas em uma das fases da pesquisa de campo.

A baixa variabilidade hídrica identificada na maioria das estações de monitoramento foi decisiva para o enfoque nos dados de temperatura. Nas séries de temperatura – do ar, da água e da rocha –, foram feitas análises estatísticas básicas e de séries temporais, interpretações visuais de gráficos, bem como análises de frequência de ocorrência de temperaturas específicas. Optou-se pela apresentação simplificada das séries de dados, com duas medidas estatísticas de dispersão – máximas e mínimas – e uma de tendência central – moda –, em função da necessidade de identificação de padrões naturais de variação e possíveis interferência antrópica nas variáveis. Na fase de monitoramento anual, considerando o período e o intervalo adotados para a coleta – 1º de abril de 2009 a 31 de março de 2010, com registros a cada 30 min –, as séries completas são compostas por 17520 dados (8760h) para cada variável ao longo de um ano completo, o que possibilitou cobrir quatro diferentes estações climáticas (verão, outono, inverno e

primavera). No entanto, os diversos problemas apresentados nos instrumentos de medição levaram a uma perda significativa de dados em algumas estações, sendo esta uma das razões para a realização do monitoramento trimestral em escala de detalhe, iniciado no dia 26 de junho de 2010 e encerrado em 30 de setembro de 2010, abrangendo quase todo o período do inverno – que se iniciou em 21 de junho e cujo término se deu em 23 de setembro de 2010.

Nesta terceira e última fase, considerando a diminuição do intervalo de coleta para cada 20 minutos, as séries completas são compostas por 6912 dados (2304h) para cada variável em cada ponto registrado.

Em seguida, são apresentados perfis temporais envolvendo as séries originais de dados e as funções de correlação identificadas, além dos perfis espaço-temporais feitos na caverna de Santana, considerando quatro variáveis: temperatura e umidade relativa do ar, gás carbônico e pressão atmosférica.

Durante a apresentação dos dados das estações monitoradas, especial atenção foi dada para os locais onde aparentemente existe a variação dos atributos espeleoclimáticos em função da presença humana, face à hipótese central desta tese, focada na obtenção de subsídios para a capacidade de carga turística de uma caverna. Para o mesmo fim, posteriormente também foram utilizados os dados de monitoramento de gás carbônico, realizados nos salões Bacon, Cristo e Flores.

Na sequência, são apresentados os resultados das análises físicas em superfície por meio de MEV, nas amostras de espeleotemas, bem como as análises químicas.

Por fim, são apresentados os vetores de dispersão e acúmulo de energia identificados na caverna de Santana, por aferição direta, inferência das correntes de ar e posição de alguns tipos de espeleotemas e pelas análises estatísticas e interpretações dos dados atmosféricos originados no monitoramento espeleoclimático.

7.2. Monitoramento Anual

7.2.1. Monitoramento da zona externa

O monitoramento da zona externa se ateve ao microclima de fundo de vale do entorno da ressurgência do rio Roncador, acesso para a caverna de Santana. No local, foi instalado um termohigrômetro para registro da temperatura e umidade relativa do ar. Além disso, foram utilizados dados secundários de chuva, para

identificar os regimes habituais do clima regional, com base em séries históricas, bem como as possíveis interferências das chuvas diárias atuais nos parâmetros analisados. O ponto de localização da estação de monitoramento externa é ilustrado na Figura 7.1.



Figura 7.1 – Localização da estação de monitoramento na zona termoclimática externa

7.2.1.1. Chuvas

Para o conhecimento da dinâmica climática local, foram utilizadas distintas séries de dados de chuva, coletados em pontos diferentes, todavia, próximos da caverna de Santana. A série histórica, compreendida entre os anos de 1972 e 2004, tem como fonte o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de São Paulo. Seu monitoramento foi feito em um ponto no bairro da Serra (Estação Serra dos Motas), distante aproximadamente 5 km da zona de recarga da caverna. Por sua vez, os dados atuais utilizados na série anual foram obtidos a partir do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), cujo ponto de coleta se localiza na sede do Município de Iporanga, a aproximadamente 30 km da zona de recarga da caverna.

Na Figura 7.2 são apresentadas as médias mensais de chuva no período entre 1972 e 2004¹⁰.

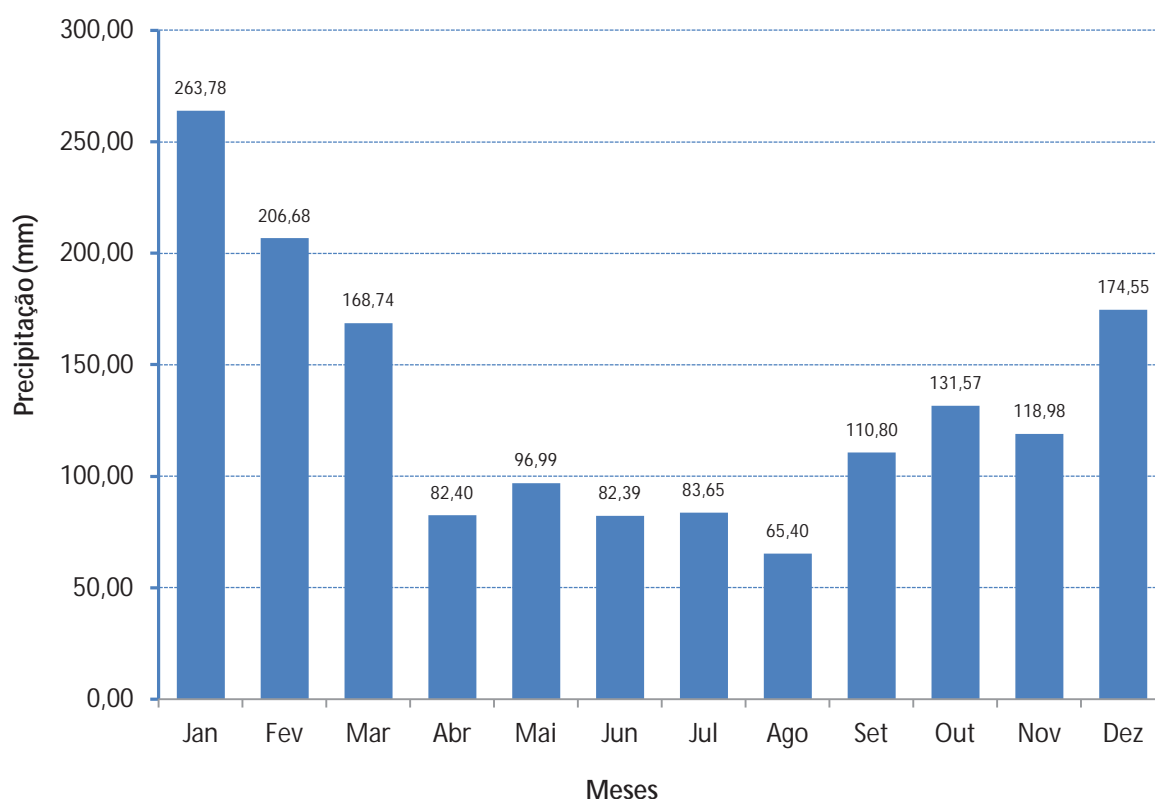


Figura 7.2 – Histograma das médias mensais de chuvas no período 1972-2004, estação Serra dos Motas (bairro da Serra, Iporanga-SP). Fonte de dados: DAEE (2010)

¹⁰ Não existem dados após 2004 para a região da caverna de Santana. Dados atuais estão sendo coletados na pesquisa de Ferrari (2009).

Os dados demonstram a sazonalidade típica anual do clima local, com um período de maior pluviosidade (setembro a março) e outro de menor quantidade de chuvas (abril a agosto). A média de chuvas nos meses de maior pluviosidade é de 167,8 mm, caindo pela metade no período mais seco, chegando a 82,2 mm. Historicamente, janeiro é o mês mais chuvoso e agosto é o mês mais seco.

Além disso, existem ciclos de maior periodicidade no regime das chuvas na região. Estes podem ser percebidos a partir da análise das médias anuais de pluviosidade no período 1972-2004, ilustradas na Figura 7.3.

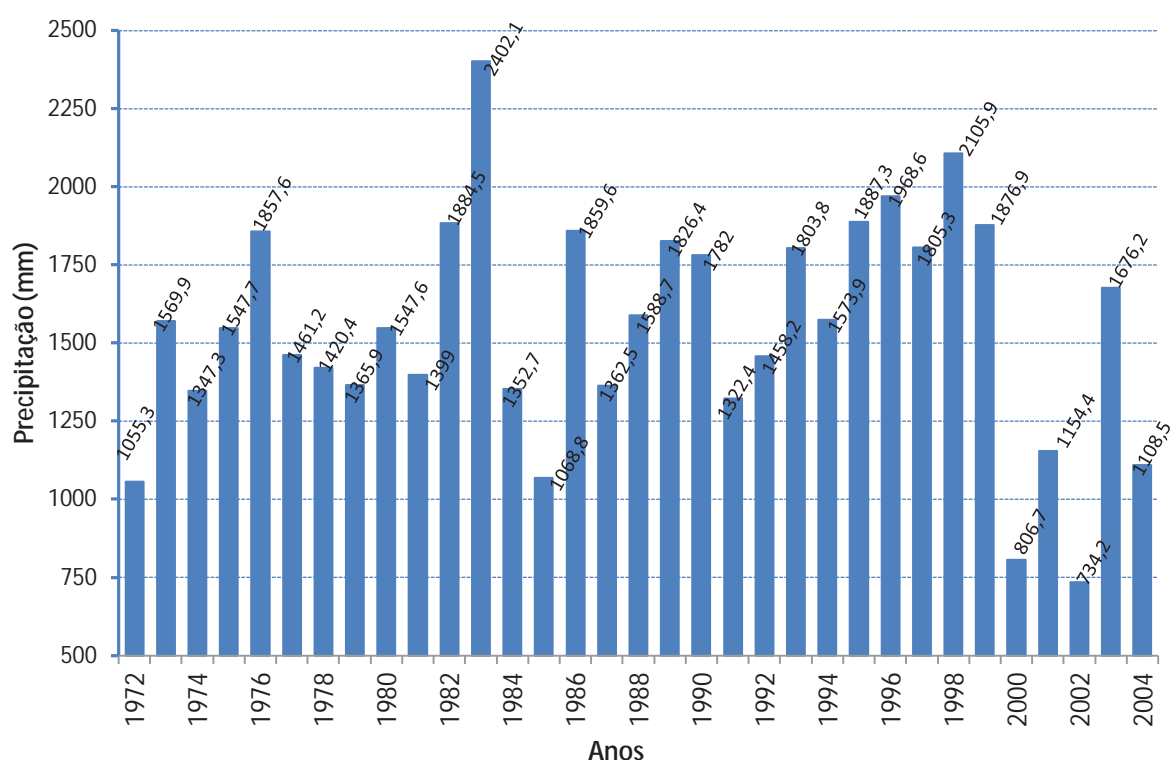


Figura 7.3 – Histograma do acumulado anual de chuvas no período 1972-2004, estação Serra dos Mota (bairro da Serra, Iporanga-SP). Fonte de dados: DAEE (2010)

Os dados representados na Figura 7.3 ilustram a existência de um ciclo com intervalo variável entre 10 e 15 anos para um ano de aumento significativo de chuvas, tal como ocorrido em 1983 (2402,1 mm acumulados) e 1998 (2105,9 mm acumulados), seguidos de anos mais secos, chegando ao extremo de 734,2 mm acumulados para o ano 2002. Nestes anos chuvosos, eventos excepcionais de chuvas intensas e contínuas são observados mesmo nos meses tradicionalmente mais secos, fugindo aos padrões habituais do clima local e demonstrando que o aumento não se deve tão somente a um acréscimo de pluviosidade na estação chuvosa, mas também no aparecimento de eventos mais extremos em outras

épocas do ano. A Figura 7.4 exibe a variação nos padrões mensais de chuva entre a média do período e os anos de 1983 e 1998.

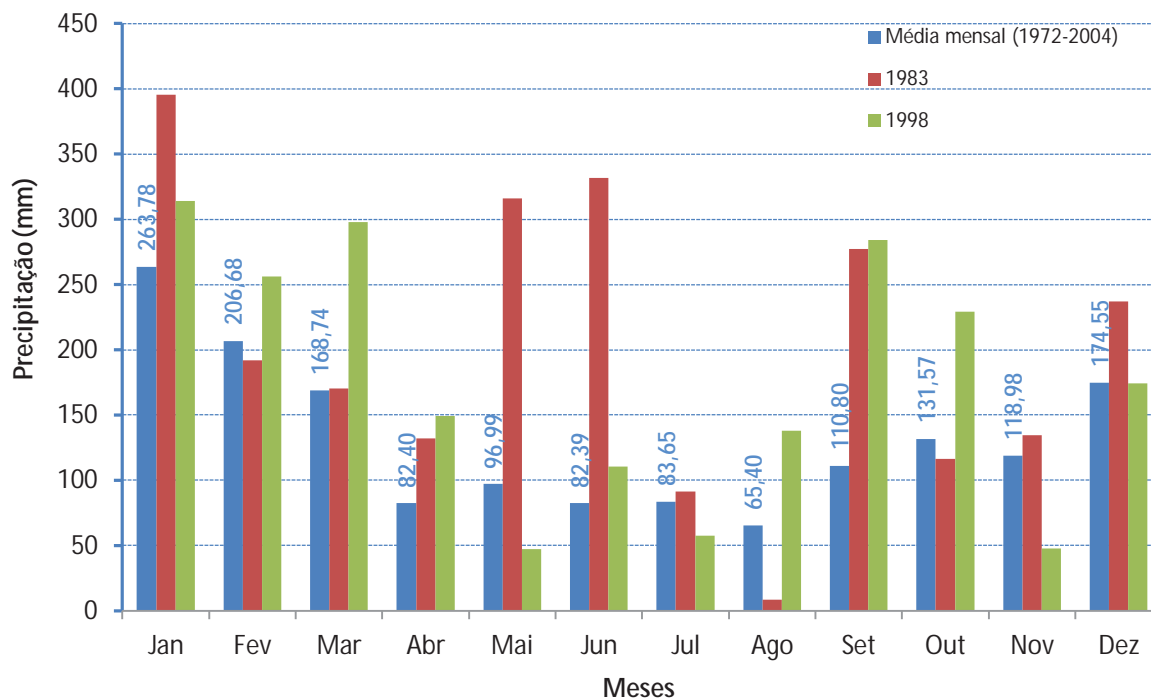


Figura 7.4 – Médias mensais de chuva comparadas: período 1972-2004; 1983; 1988. Fonte de dados: DAEE (2010)

A Figura 7.4 ilustra um aumento expressivo da pluviosidade nos meses de maio, junho e setembro em 1983 e nos meses de agosto, setembro e outubro em 1998. Embora a série analisada se encerre no ano de 2004, algumas comparações puderam ser feitas com a condição climática do período da pesquisa, no ano de 2009. Para tanto, foram consultados dados do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), que embora não faça monitoramento de chuvas em Iporanga, possui estações nos municípios de Ribeira, Eldorado e Capão Bonito, o que permite envolver Iporanga por interpolação espacial de dados. Nestes três municípios foram registrados eventos excepcionais de acumulado de chuva diária, atingindo valores da ordem de grandeza de 100 mm em julho e de 80 mm em setembro. Estas máximas conferem com o esperado para esta época do ano, considerando um ano de chuvas excepcionais – 12 anos após o último ano com tais características –, o que é corroborado pelo ciclo observado na Figura 7.3.

O ano de chuvas excepcionais em 2009 também pode ser confirmado ao se comparar os dados de umidade relativa do ar da estação externa entre o pré-teste

de setembro de 2008, o monitoramento piloto de setembro de 2009 e o monitoramento feito na terceira fase, em 2010. A estatística descritiva destes dados é apresentada na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Comparação das medidas de dispersão e tendência central da umidade relativa do ar externa entre os meses de setembro de 2008, 2009 e 2010

Medida Estatística	Setembro de 2008	Setembro de 2009	Setembro de 2010
Média	84,24%	98,73%	94,34%
Moda	99,9%	99,9%	99,9%
Máxima	99,9%	99,9%	99,9%
Mínima	52,2%	63,1%	55,8%
Amplitude	47,7%	36,8%	44,1%
Desvio padrão	14,96	4,46	7,33
Variância	223,80	19,90	53,84

Percebe-se que o mês de setembro de 2009 foi comparativamente muito mais estável em sua variabilidade hídrica, o que pode ser interpretado a partir do desvio padrão, da variância e da mediana. Além disso, as medidas de tendência central – com ênfase na média – e de dispersão – com ênfase na mínima – demonstram que para o mês em questão, o ano de 2009 foi muito mais úmido do que 2008 ou 2010.

Com estes dados, foi possível caracterizar de forma geral as condições de chuvas excepcionais para o ano de 2009, durante o desenvolvimento da pesquisa. Estas refletiram em diversos aspectos do trabalho de campo – desde o funcionamento de equipamentos até o aumento das águas de percolação em galerias fósseis da caverna de Santana –, o que será exposto nas próximas subseções deste capítulo.

7.2.1.2. Temperatura e umidade relativa do ar da estação Externa

Os dados de temperatura do ar da estação Externa da caverna correspondem tão somente ao monitoramento realizado, em termohigrômetro instalado a aproximadamente 50 m de seu acesso principal. As séries simplificadas são apresentadas na Figura 7.5.

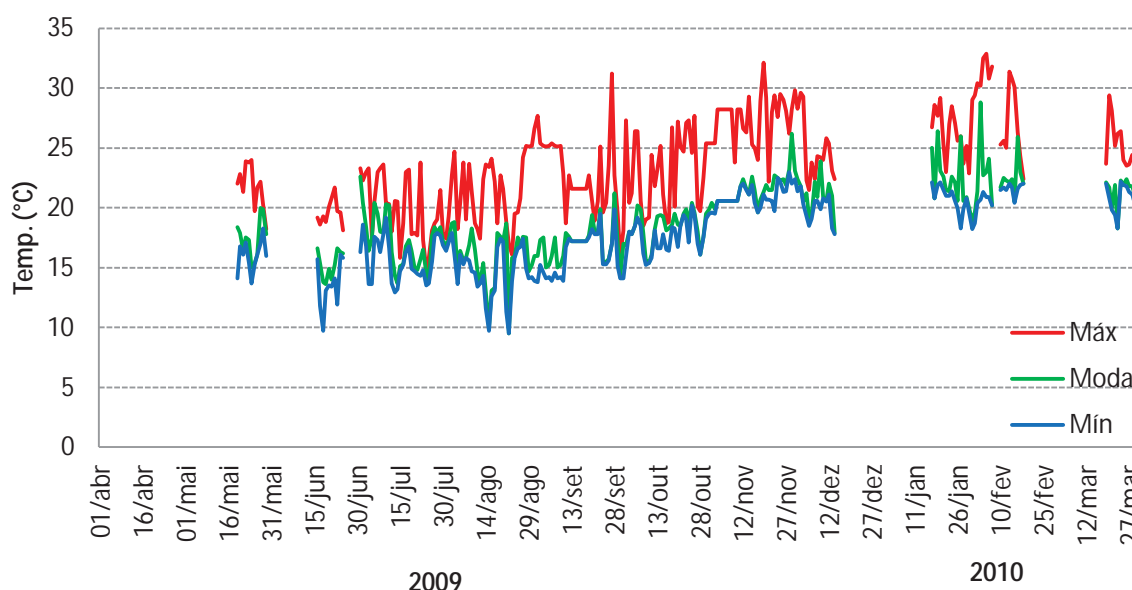


Figura 7.5 – Séries simplificadas da temperatura do ar na estação Externa, com medidas de dispersão – máxima e mínima – e de tendência central – moda – para o período entre 01 de abril de 2009 e 31 de março de 2010. Os intervalos sem registro, neste e nos próximos gráficos, devem-se a problemas no instrumento de medição.

As maiores máximas durante o período foram registradas nos meses de setembro/2009 (31,2 °C), novembro/2009 (32,1 °C) e fevereiro/2010 (32,9 °C e outras oito máximas diárias acima dos 30 °C). Por sua vez, as menores mínimas foram registradas nos meses de junho/2009 (9,7 °C) e agosto/2009 (9,5 °C e 9,7 °C). Os meses habitualmente mais quentes no período monitorado foram novembro/2009, janeiro e fevereiro/2010, enquanto que os mais frios foram julho e agosto de 2009.

Quanto às medidas de tendência central da série externa completa de temperatura, a média anual foi 19,99 °C, a moda 17,9 °C e a mediana 19,9 °C. Para a umidade relativa do ar, a moda, mediana e máxima foram de 99,9%, enquanto a média foi de 98,9% e a mínima chegou a 60,2%. A amplitude térmica anual foi de 23,4°C e a higríca de 39,7%.

As diversas falhas apresentadas na série original comprometem uma análise global dos dados por meio de técnicas de estatística para séries temporais. Assim, as análises que se seguem se ativeram ao período mais longo dentro da série original, entre 1° de julho e 13 de dezembro de 2009, totalizando 166 dias completos. Nesta série selecionada foram utilizadas a suavização, a autocorrelação e a densidade espectral.

A suavização foi feita por meio da média móvel, o que contribui para a visualização de grandes anomalias sem, no entanto, estabelecer umnexo causal sobre sua origem. O resultado é apresentado na Figura 7.6.

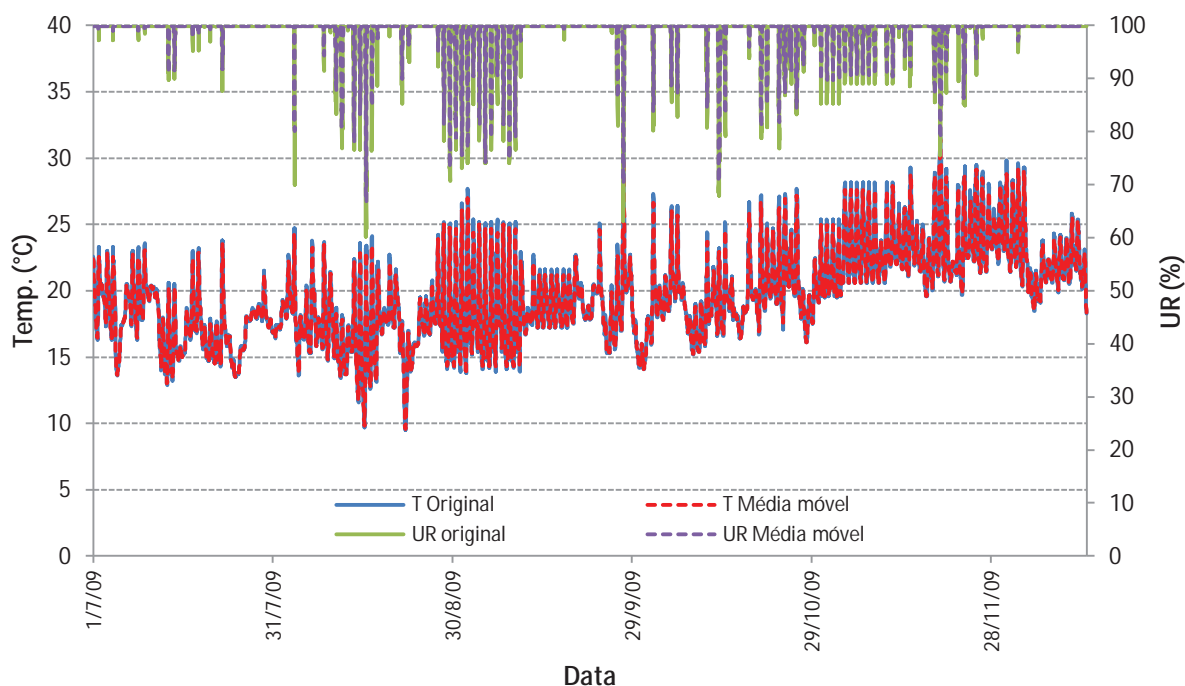


Figura 7.6 – Séries originais de temperatura e umidade relativa do ar (UR) e respectivas médias móveis, na estação Externa, para o período entre 1° de julho e 13 de dezembro de 2009

As médias móveis apresentadas, tanto de T quanto de UR, não demonstram grande diferença em relação às séries originais, o que demonstra a inexistência de anomalias na série analisada.

Na sequência, as Figuras 7.7 e 7.8 apresentam as funções de autocorrelação e densidade espectral da série selecionada, para a temperatura do ar.

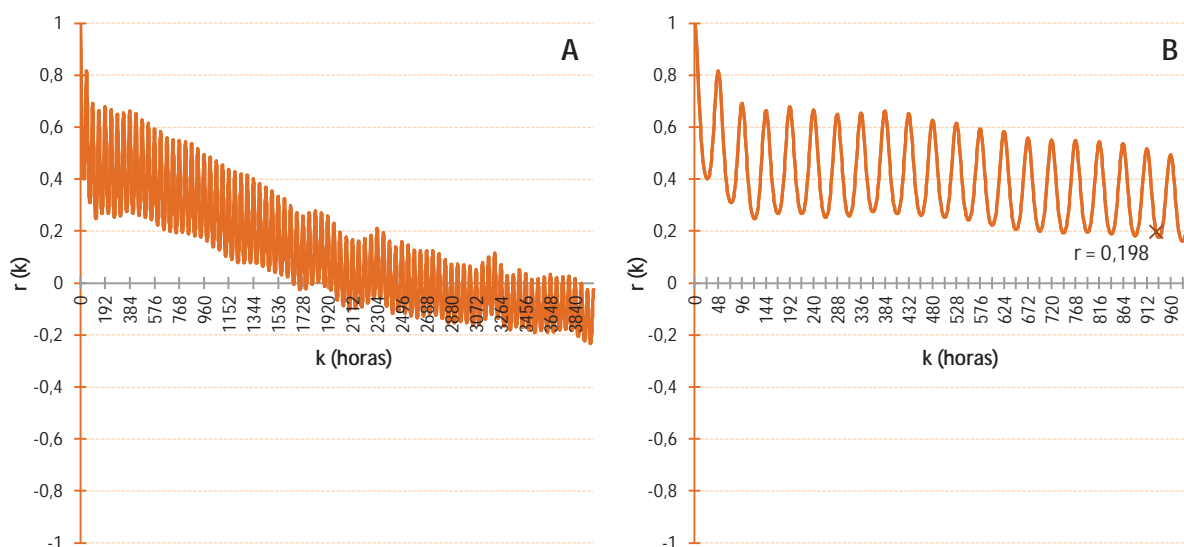


Figura 7.7 – Função de autocorrelação de toda a série selecionada (A) e, em detalhe, das primeiras 500 horas (20,8 dias) (B) na estação Externa

A função de autocorrelação foi aplicada a uma série com 3984h (166 dias). Sua variação evidencia uma periodicidade cíclica de 24h na série selecionada, tal como pode ser observado na Figura 7.7A e, com mais detalhe e clareza, na Figura 7.7B. O efeito de memória do sistema é de aproximadamente 930h (38,75 dias), quando o índice r atinge o valor de 0,198. De um modo geral, a função de autocorrelação apresenta uma tendência decrescente em função do tempo, mas de forma muito lenta, o que não era esperado para um ambiente de elevada dinâmica atmosférica como o externo à caverna. Este padrão decrescente se repete nas demais séries analisadas em outras estações de monitoramento.

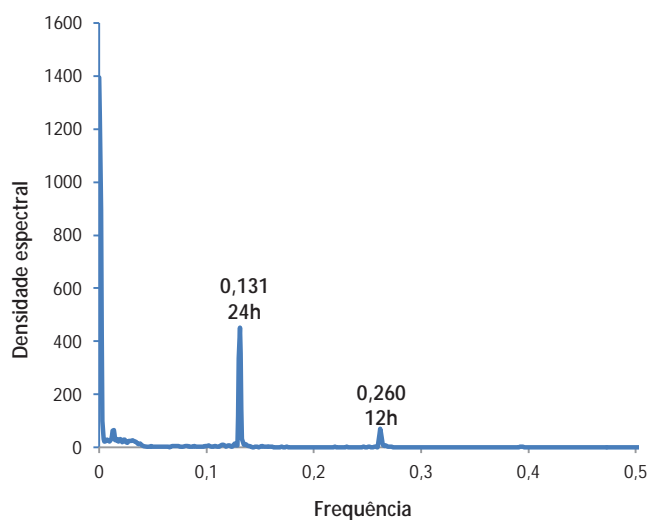


Figura 7.8 – Função de densidade espectral da série selecionada na estação Externa

A densidade espectral apresenta picos de 24h e 12h em altas densidades espectrais, o que é coerente com a dinâmica atmosférica e com a função de autocorrelação. Entretanto, apresenta um valor elevado de densidade espectral próximo à frequência zero, o que demonstra a existência de fenômenos periódicos que excedem temporalmente a série analisada.

7.2.2. Monitoramento da zona transicional

A zona termoclimática transicional contou com duas estações de monitoramento: uma fora da caverna, na ressurgência do rio Roncador – local denominado “Boca”; e outra na galeria do rio em um local logo após a primeira ponte da passarela interna, a aproximadamente 45 m da boca, denominada “Rio I”. Em ambos os pontos, foram monitorados a temperatura e a umidade relativa do ar. A posição relativa das duas estações na caverna é ilustrada na Figura 7.9.



Figura 7.9 – Localização das estações de monitoramento da zona termoclimática transicional

7.2.2.1. Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Boca

A temperatura do ar na entrada da caverna de Santana recebe forte influência do ambiente externo, principalmente em relação às mínimas atingidas, conforme foi possível registrar na Estação Boca. Mas, de um modo geral, foi possível observar que o espeleoclima nessa parte da caverna possui forte relação com o espeleoclima do interior da cavidade, com a tendência de suas amplitudes higrotérmicas diárias serem comparativamente mais atenuadas em relação às variações climáticas do meio externo. De um modo geral, os padrões térmicos desta estação de monitoramento da cavidade são observados na Figura 7.10.

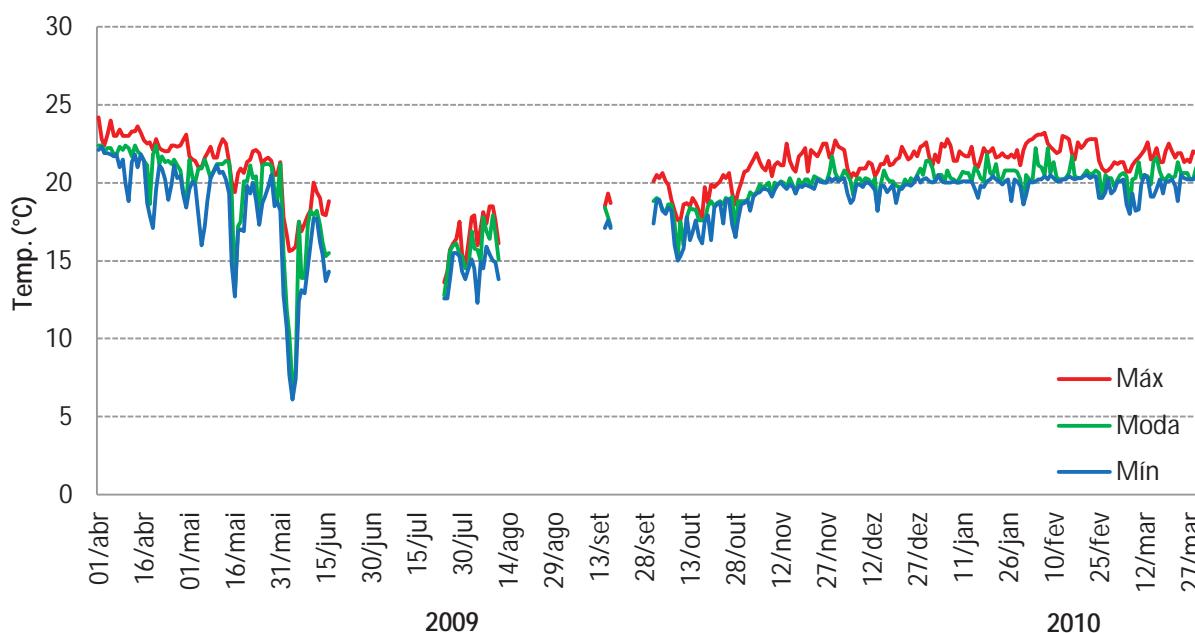


Figura 7.10 – Séries simplificadas da temperatura do ar na estação Boca, com medidas de dispersão – máxima e mínima – e de tendência central – moda – para o período entre 1° de abril de 2009 e 31 de março de 2010

Os maiores extremos observados na estação Boca ocorrem nas mínimas diárias. O mais notável de todos ocorreu no mês de junho/2009, quando a temperatura mínima chegou a 6,1 °C no dia 4, às 7h 30min. Esta foi a temperatura mais baixa registrada em toda a série anual em todas as estações, dado que neste dia, a estação Externa não estava funcionando. Por sua vez, a máxima de temperatura nesta estação foi de 24,2 °C, no dia 1° de abril/2009.

Quanto às medidas de tendência central de temperatura na estação boca, a média anual de temperatura foi de 19,78 °C, a moda foi 20,3 °C e a mediana foi de 20,4 °C. As medidas de tendência central e dispersão para a umidade relativa do ar

foram de: 99,78% para a média; 99,9% para a moda, mediana e máxima; e 83,8% para a mínima. A amplitude térmica anual foi de 18,1 °C e a higríca foi de 16,1%.

Os meses de maio/2009 e julho/2009 foram os mais frios nesta estação, contrapondo os meses mais quentes de dezembro/2009 e fevereiro/2010.

Tal como na estação Externa, as falhas nos dados da estação Boca inviabilizam a adequada análise estatística de séries temporais. Assim, foi selecionado o maior período contínuo dentro da série completa, correspondente ao período entre 1° de outubro de 2009 e 31 de março de 2010, com um total de 182 dias em seis meses completos. Os dados deste período e sua respectiva suavização por meio da média móvel são apresentados na Figura 7.11.

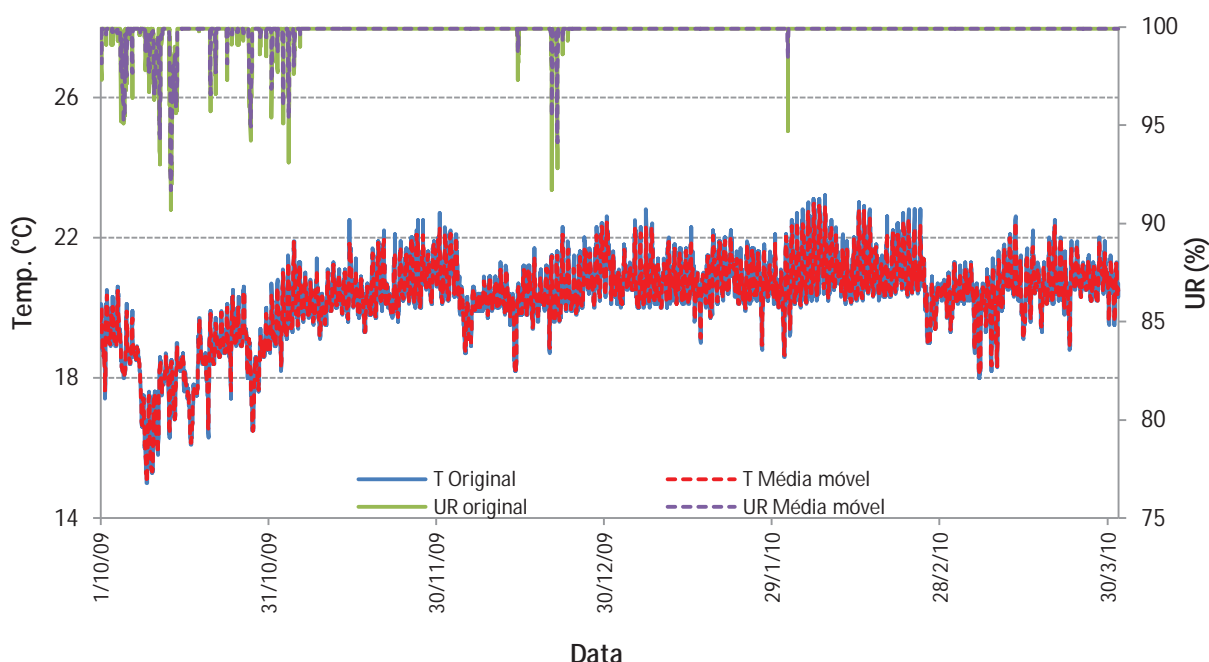


Figura 7.11 – Séries originais de T e UR e respectivas médias móveis, na estação Boca, para o período entre 1° de outubro de 2009 e 31 de março de 2010

Os dados de T e UR da estação Boca também não apresentam grandes anomalias na série selecionada, o que pode ser observado pelas médias móveis da Figura 7.11. Percebe-se ainda a presença de um ciclo diuturno, o que demonstra a influência do clima externo da caverna, mesmo que mais atenuado.

Nota-se também maior saturação higríca do ar, pela manutenção em longo prazo da UR no valor de 99,9%. Além disso, as mínimas de UR não foram inferiores a 90%, evidenciando forte influência da atmosfera subterrânea em estado de saturação higríca na ressurgência do rio Roncador.

A mesma série parcial de dados da estação boca foi analisada por meio das funções de autocorrelação e densidade espectral, cujos resultados são apresentados na Figura 7.12.

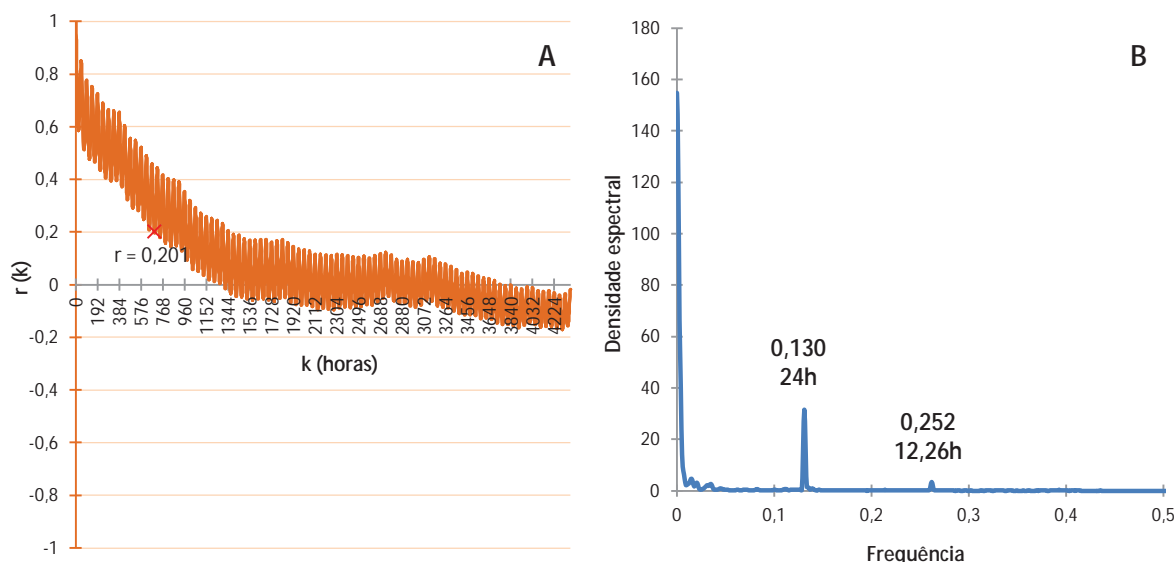


Figura 7.12 – Funções de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série selecionada na estação Boca

A série de dados utilizada abrange 4368h (182 dias). A função de autocorrelação exibe uma periodicidade cíclica de 24h nesta estação, o que demonstra relação direta com os dados da estação externa. O efeito de memória deste ponto do sistema corresponde a um período de 693h (28,87 dias), quando r é igual a 0,201.

A função de densidade espectral corrobora a interpretação da autocorrelação, apresentando ciclos de 24h e de aproximadamente 12h, com elevadas densidades espectrais. Por outro lado, a existência de picos de alta densidade em baixas frequências sugere a existência de fenômenos sazonais não evidenciados no intervalo de tempo considerado.

Embora a densidade espectral seja menor – fruto de maior estabilidade atmosférica relativa –, os ciclos diuturnos ainda aparecem de forma nítida na análise. Isto ocorre em função da dinâmica atmosférica de troca gasosa entre a caverna e o meio externo. Durante o dia, na maior parte do ano, o ar fora da caverna é mais quente do que dentro, o que faz com que haja poucas trocas gasosas na região da ressurgência entre os meios interno e externo, dado que a conformação física da caverna de Santana não gera sistemas de pressão diferenciada entre ar

quente/leve e ar frio/pesado em clarabóias mais altas. No entanto, no período da noite, especialmente nos meses mais frios, o ar fora da caverna fica mais frio que em seu interior. Esta diferença substancial promove trocas gasosas em busca do equilíbrio térmico, o que faz com que o ar relativamente mais quente do meio subterrâneo saia do interior da cavidade. Essa movimentação gasosa gera ciclos de aproximadamente 12h, divididos pelos extremos mais quentes do meio da tarde e mais frios do fim da madrugada. Com isso, estabelece-se um ciclo diuturno de 24h, identificado nas funções de autocorrelação e de densidade espectral.

7.2.1.2. *Varição da temperatura e umidade relativa do ar na estação Rio I*

A estação Rio I se localiza no interior da caverna, a aproximadamente 45 m da ressurgência do rio Roncador, logo após a primeira ponte sobre ele instalada. A Figura 7.13 apresenta as primeiras análises estatísticas da série coletada.

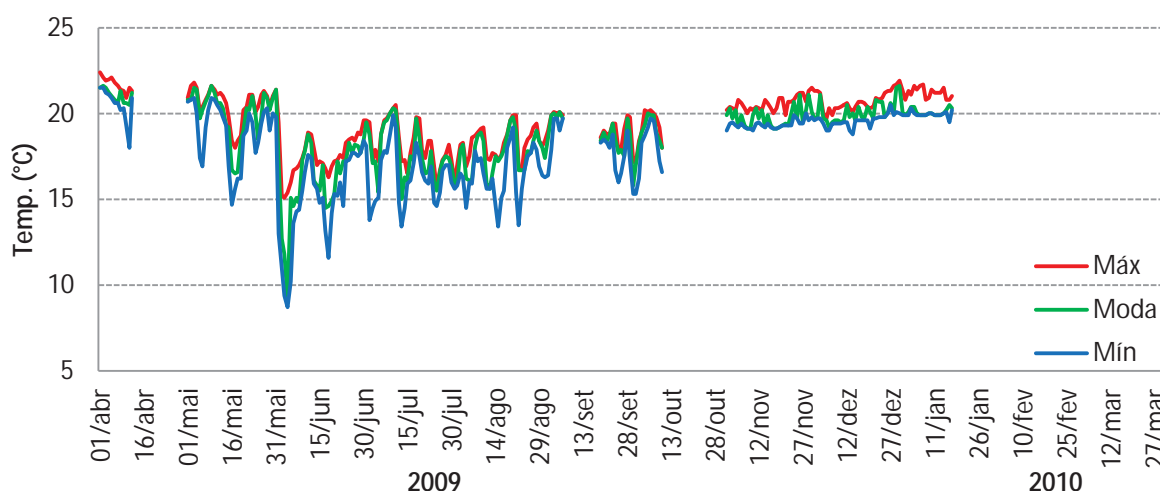


Figura 7.13 – Séries simplificadas da temperatura do ar na estação Rio I, com medidas de dispersão – máxima e mínima – e de tendência central – moda – para o período entre 1º de abril de 2009 e 31 de março de 2010

Embora em intensidade mais atenuada, ainda nesta estação se observa grande influência do microclima externo, principalmente nas mínimas diárias. Este fenômeno foi mais evidente no período entre os meses de junho/2009 a agosto/2009, com o registro de diversos vales nas mínimas diárias e o registro de uma amplitude diária de 6,7 °C no dia 4 de junho. No mesmo dia, foi registrada a temperatura mais baixa desta estação, de 8,7 °C entre as 7h e 7h 30min, acompanhando o fenômeno registrado na mesma data e horário semelhante na

estação boca. Os meses de novembro e dezembro de 2009 apresentaram as temperaturas mais elevadas, mas com máximas abaixo da casa dos 22 °C.

Quanto às medidas de tendência central da série completa de temperatura na estação Rio I, a média anual de temperatura foi de 18,76 °C, a moda foi 19,9 °C e a mediana foi de 19,4 °C. As medidas de tendência central e dispersão para a umidade relativa do ar foram de: 98,79% para a média; 99,9% para a moda, mediana e máxima; e 71,9% para a mínima. A amplitude térmica anual foi de 13,7 °C e a higríca foi de 28%. Chama à atenção a mínima registrada na umidade relativa, inferior à mínima registrada na estação Boca – 83,8%. Considerando que a saturação higríca tende a se atenuar à medida que se aproxima do meio externo e se acentuar em direção ao interior da caverna, era de se esperar o contrário: um valor menor na estação Boca e maior na estação Rio I. Isso pode evidenciar uma condensação no sensor de umidade relativa na estação Boca, de forma a mascarar alguns valores mínimos. Tal hipótese é coerente com a localização do sensor, em área de grande variação térmica e, portanto, sujeita a maior condensação.

Na estação rio I, foi selecionado o período entre os dias 1° de maio de 2009 e 3 de setembro de 2009, para a suavização do dados, totalizando 129 dias completos, com resultados apresentados na Figura 7.14.

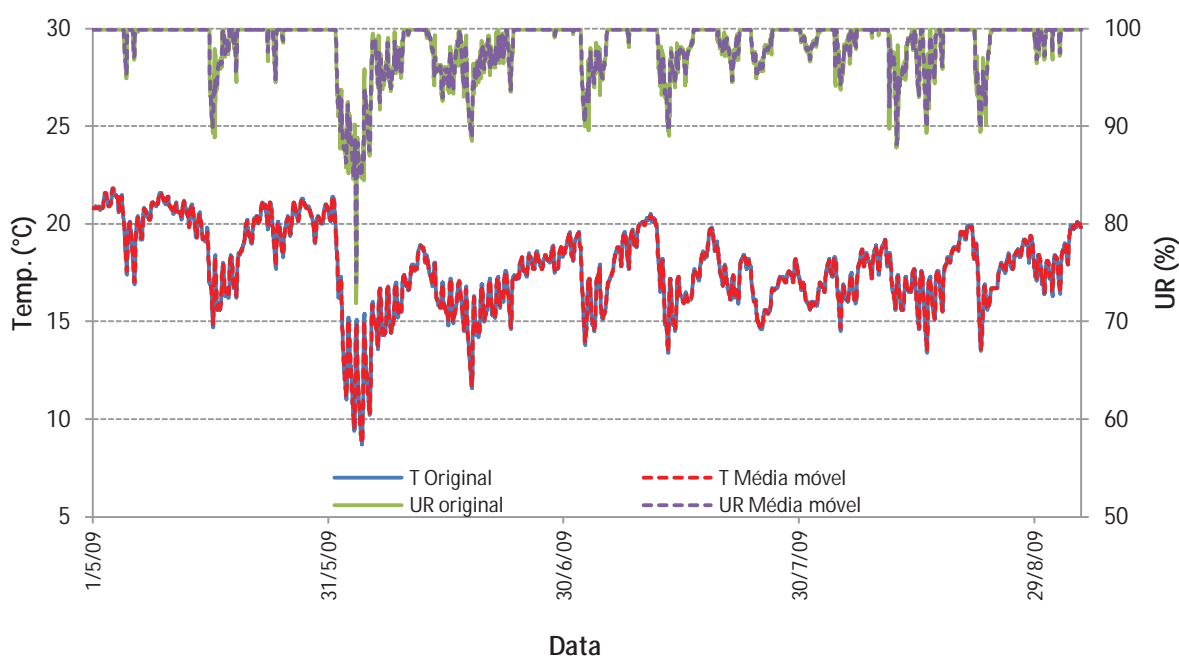


Figura 7.14 – Séries originais de T e UR e respectivas médias móveis, na estação Rio I, para o período entre 1° de maio e 31 de setembro de 2009

A comparação entre as médias móveis e as séries originais não evidencia grandes anomalias nas séries de dados no período selecionado. Percebe-se maior incidência de reduções periódicas na saturação hídrica do ar, o que é coerente com a época do ano, mesmo para uma estação localizada já no interior da caverna. Isto porque trata-se de uma zona com acentuada dinâmica atmosférica, sujeita a variações diárias de grande amplitude – como já demonstrado na Figura 7.12 –, o que se percebe também pelos gráficos de resíduos do período (Figura 7.15).

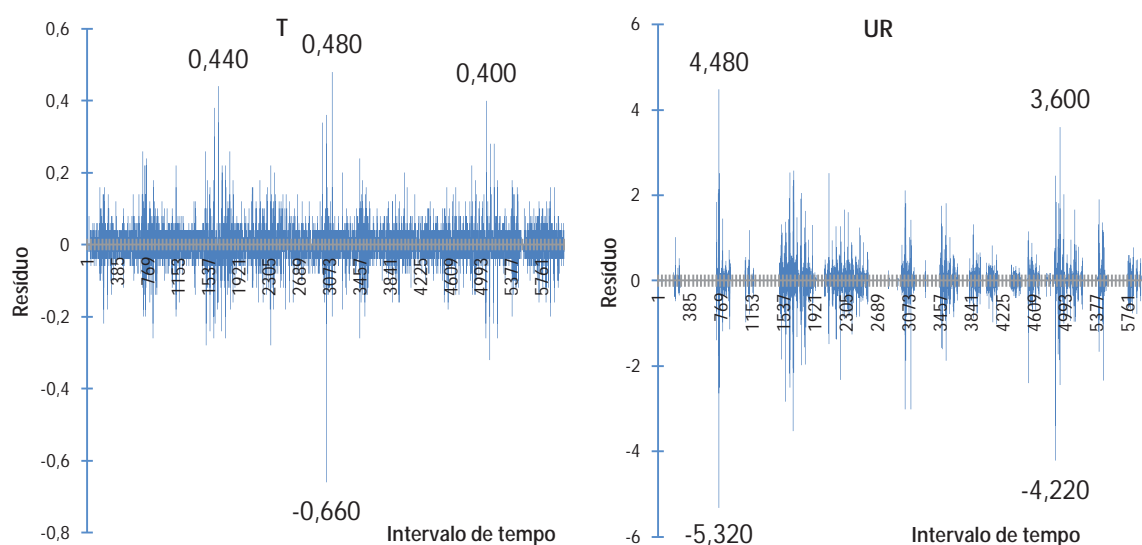


Figura 7.15 – Gráficos de resíduos da série original x médias móveis, na estação Rio I, para o período entre 1º de maio e 31 de setembro de 2009

Os valores extremos de resíduos, apresentados em rótulos nos gráficos de T e UR da Figura 7.15, evidenciam grandes amplitudes diárias de cada um dos parâmetros analisados. No entanto, fatores como: a) a localização desta estação em zona de elevada dinâmica atmosférica; b) os dados da Figura 7.14, que demonstram que as variações se processam em horários em que a caverna está fechada para a visitação; c) o aumento da amplitude térmica, diretamente ligado à ampliação das mínimas diárias, e não das máximas; são evidências suficientes para eliminar a possibilidade de interferência antrópica nos extremos identificados.

A série de dados de temperatura do ar do período selecionado também foi analisada por meio das funções de autocorrelação e densidade espectral, com os resultados apresentados na Figura 7.16.

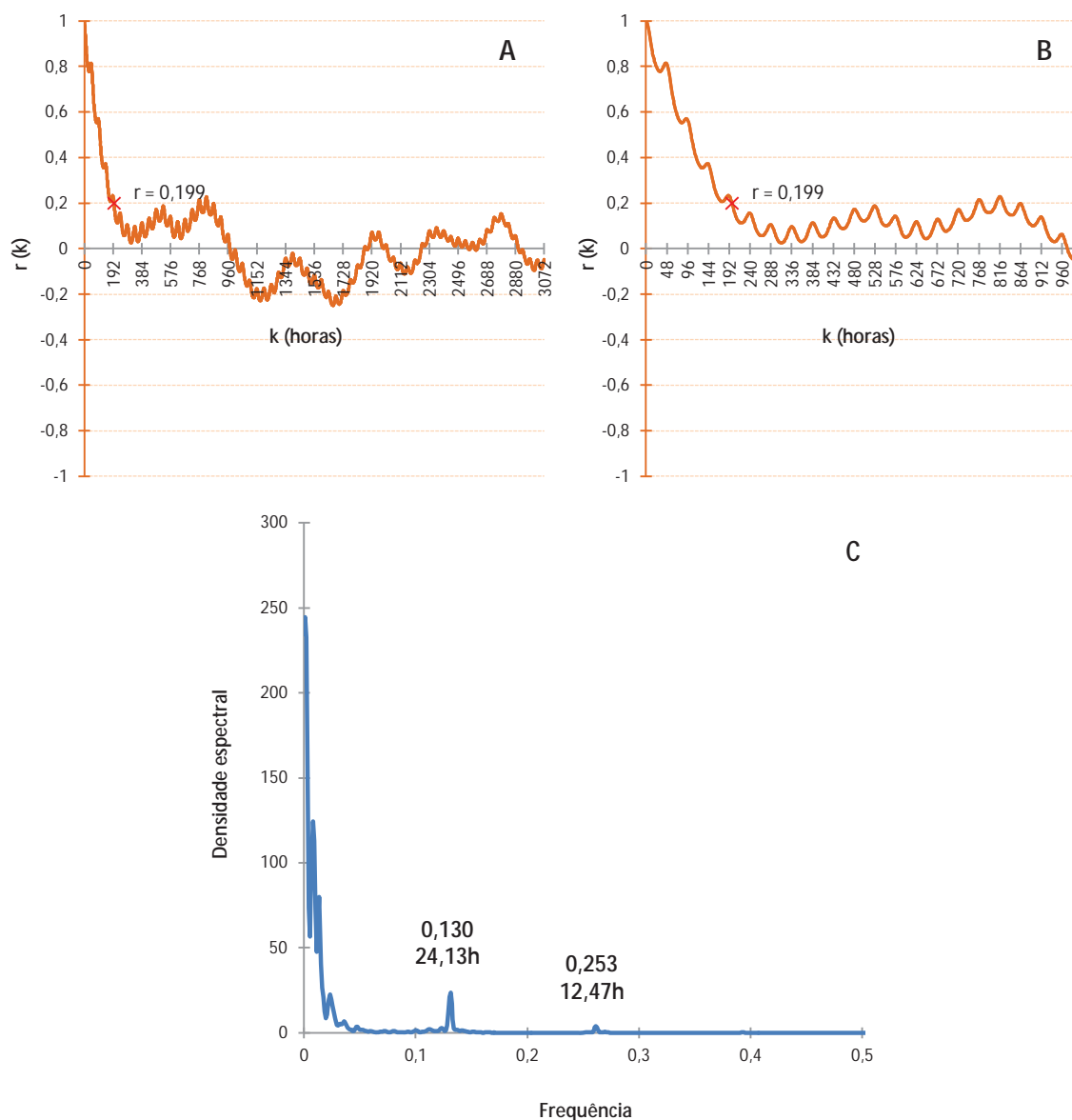


Figura 7.16 – Funções de autocorrelação (A e B) e densidade espectral (C) da série selecionada na estação Rio I

A função de autocorrelação da série selecionada de 3072h (128 dias) na estação Rio I apresenta um efeito memória de 198h (8,25 dias) para este ponto do sistema (Figura 7.16A). Com isso, fica cada vez mais evidente o aumento de sua estabilidade atmosférica à medida que se avança ao interior da caverna. No entanto, a periodicidade diurna de 24h, reflexo do microclima exterior, ainda pode ser notada (Figura 7.16B). A autocorrelação ilustra a existência de uma periodicidade evidente nos dados, porém menos acentuada que nas estações anteriores.

Esta interpretação é corroborada pela densidade espectral (Figura 7.16C), que ainda permite a identificação de ciclos da grandeza de 24h e 12h, mas em densidades menores do que nas estações anteriores. Além disso, outros picos de

alta densidade se formam próximos a zero, o que demonstra a existência de fenômenos cíclicos de maior periodicidade, não inseridos na série.

7.2.3. Monitoramento da zona interna típica

A zona termoclimática interna típica, correspondente a um trecho da galeria do rio Roncador, foi monitorada em duas estações. A primeira delas, denominada Rio II, localiza-se entre a escada de acesso à galeria superior e o espeleotema conhecido como pata do elefante, a aproximadamente 200 m da boca. A segunda estação, denominada Rio III, se localiza na zona de espraiamento do rio Roncador logo após o término do circuito de visitação, a aproximadamente 300 m de distância da ressurgência. A posição relativa destas estações é apresentada na Figura 7.17.



Figura 7.17 – Localização das estações de monitoramento da zona termoclimática interna típica

7.2.3.1. *Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Rio II*

Em linhas gerais, o comportamento da temperatura do ar da estação Rio II se assemelha graficamente ao apresentado nas estações Boca e Rio I. Todavia, os fenômenos atmosféricos registrados são atenuados pela distância em relação à boca, pela conformação física da galeria do rio e pelo padrão geral de desenvolvimento da caverna de Santana – elementos que serão mais bem analisados em seção posterior, sobre a dinâmica atmosférica. As medidas de dispersão e tendência central dos dados coletados são apresentadas na Figura 7.18.

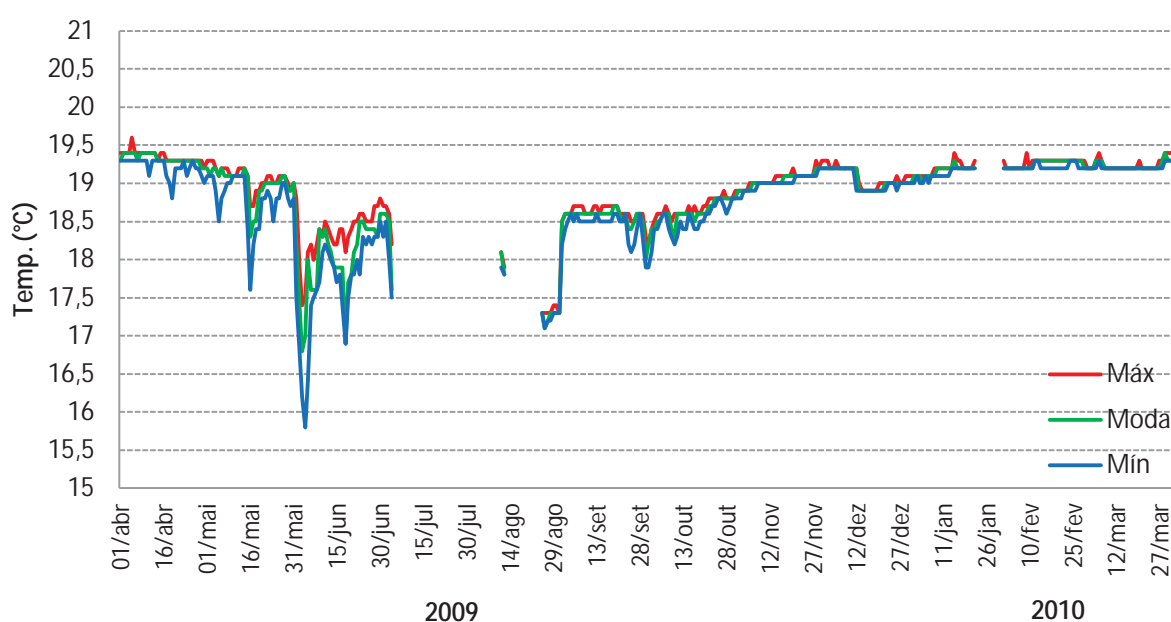


Figura 7.18 – Séries simplificadas da temperatura do ar na estação Rio II, com medidas de dispersão – máxima e mínima – e de tendência central – moda – para o período entre 1º de abril de 2009 e 31 de março de 2010

A estação Rio II ainda apresenta respostas diretas em relação aos estímulos gerados pelo microclima externo. Tal como nas estações Boca e Rio I, estes fenômenos foram evidentes nas temperaturas mais frias. No dia 4 de junho, a amplitude térmica diária nesta estação chegou a 1,7 °C – valor alto neste local –, com a mínima diária chegando a 15,8 °C. A máxima registrada nesta estação foi de 19,6 °C, às 12h 30min do dia 5 de abril de 2009. Trata-se, no entanto, de ocorrência isolada, influenciada pelo microclima externo, que também elevou em 0,2 °C a temperatura das estações Boca e Rio I no mesmo momento. Excetuado este valor extremo, a máxima anual registrada nesta estação foi de 19,4 °C.

Quanto às medidas de tendência central da série completa de temperatura na estação Rio II, a média anual de temperatura foi de 18,86 °C, a moda foi 19,2 °C e a mediana foi de 19 °C. As medidas de tendência central e dispersão para a umidade relativa do ar foram de: 99,84% para a média; 99,9% para a moda, mediana e máxima; e 91,4% para a mínima. A amplitude térmica anual foi de 3,8 °C e a higríca foi de 8,5%.

Nesta estação ainda se evidenciam períodos alternados de meses mais frios e quentes, sendo o período mais frio entre os meses de maio e setembro de 2009, e os demais meses monitorados relativamente mais quentes. Os meses de meia estação, evidenciados nas primeiras estações de monitoramento, já não se distinguem mais neste local.

Na série anual da estação Rio II, foi selecionado o período de dados contínuos entre 26 de agosto de 2009 e 21 de janeiro de 2010. A suavização da série por meio da média móvel e os dados originais são apresentados na Figura 7.19.

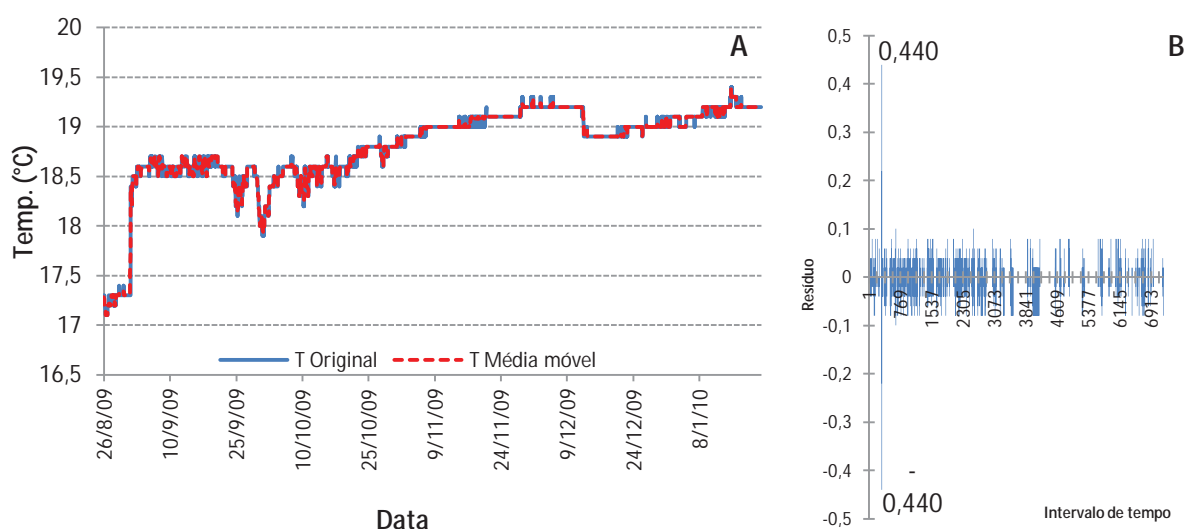


Figura 7.19 – Séries originais de T e UR, suas médias móveis (A) e respectivo gráfico de resíduos da suavização da série original x média móvel (B), na estação Rio II, para o período entre 26 de agosto de 2009 e 21 de janeiro de 2010

O gráfico A da Figura 7.19 ilustra a inexistência de grandes anomalias na suavização dos dados. O período selecionado inclui a transição entre um mês frio – agosto/2009 – e outro mais quente – setembro/2009 –, gerando grande incremento na temperatura, da ordem de mais de 1 °C. Esta diferença significativa se destaca no gráfico de resíduos (Figura 7.19B), atingindo os índices de 0,440 e -0,440. No

entanto, a variação é coerente com a dinâmica atmosférica identificada para a estação Rio II e sua relação com as estações mais próximas do meio externo, tratando-se, neste caso, de uma alteração de ordem natural.

Para a série selecionada, foram aplicadas as funções de autocorrelação e densidade espectral. Os resultados são apresentados na Figura 7.20.

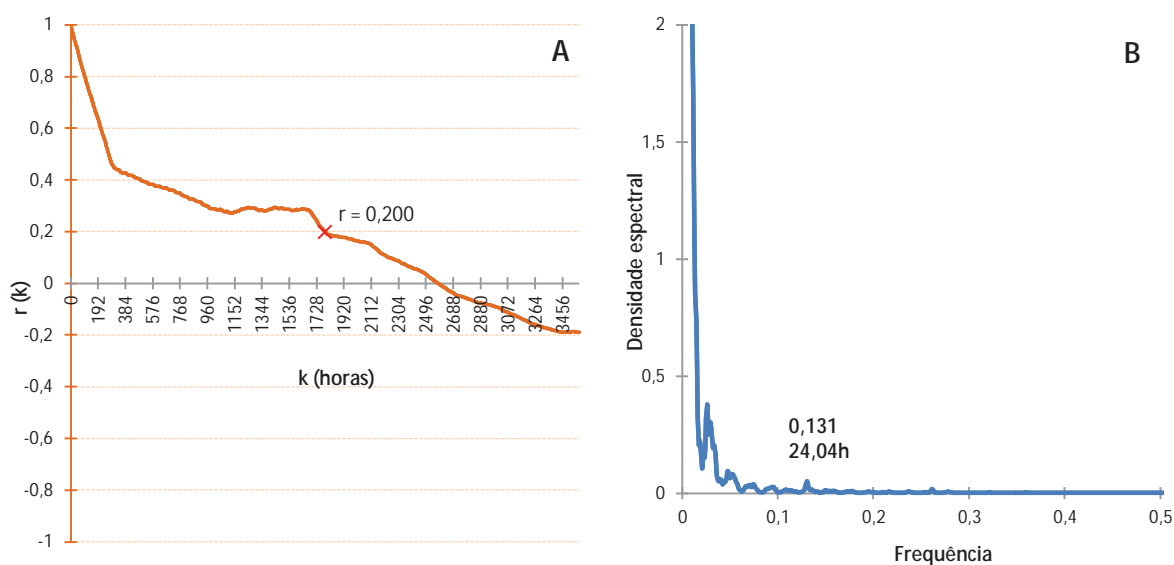


Figura 7.20 – Funções de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série selecionada na estação Rio II

Para a análise desta estação, foi selecionada uma série de 3576h (149 dias). A função de autocorrelação (Figura 7.20A) apresenta um efeito de memória de 1786h (74,41 dias) para este ponto do sistema. O valor obtido e o padrão de tendência da autocorrelação se alteram em relação às estações da zona termoclimática anterior – embora a tendência permaneça decrescente. A densidade espectral reforça esta interpretação devido à existência de picos significativos apenas em densidade muito baixa (Figura 7.20B).

Todavia, o padrão de variação da Figura 7.18 sugere uma grande relação visual no comportamento da temperatura do ar desta estação com as anteriores, nos meses mais frios. Assim, a série parcial correspondente a estes meses, com um total de 2256h (94 dias), foi selecionada e analisada por meio da função de autocorrelação. O resultado é apresentado na Figura 7.21.

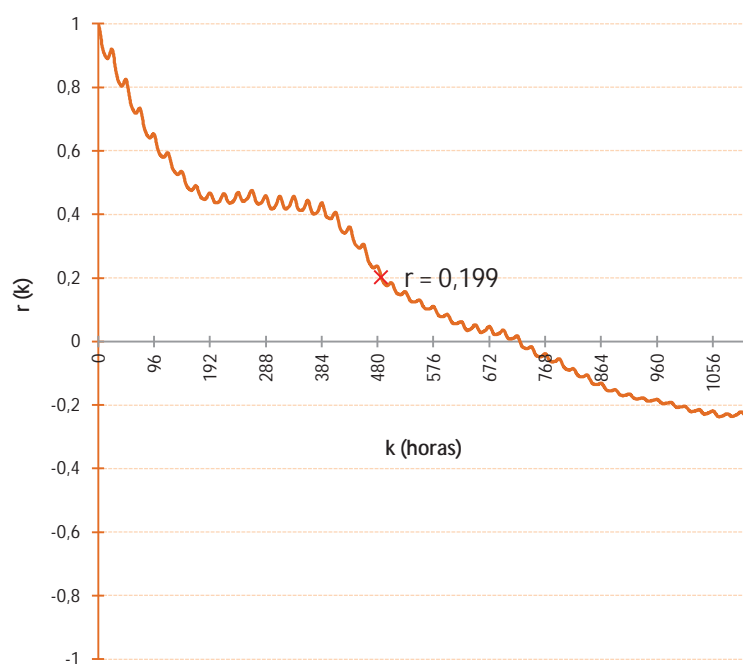


Figura 7.21 – Função de autocorrelação para a série dos dias 1º de abril/2009 a 3 de julho/2009, na estação Rio II

A função de autocorrelação da série inicial de dados da estação Rio II (Figura 7.21) ilustra uma situação totalmente distinta daquela apresentada na Figura 7.20A. O efeito de memória deste trecho do sistema caiu de 1786h (74,41 dias) para 973h (40,54 dias), com índice r atingindo 0,199. Além disso, os ciclos diurnos de 24h voltam a aparecer. Desta forma, fica evidente a necessidade de um aprofundamento nas pesquisas neste trecho da caverna, de forma contínua e sazonal, bem como a realocação do ponto de instalação da estação, para permitir uma análise mais ampla que permita captar, em uma única função, os dois padrões de variação detectados.

7.2.3.2. *Variação da temperatura do ar, da água e umidade relativa do ar na estação Rio III*

A estação de monitoramento Rio III localiza-se a aproximadamente 300 m da ressurgência do rio Roncador, em trecho periférico ao circuito turístico da caverna. O objetivo do monitoramento deste ponto era verificar as possibilidades de interferência indireta da presença humana neste ponto, dado que o circuito de visitação passa a apenas 25 m de distância. Também neste local, foi feito o monitoramento da temperatura da água do rio, de forma a verificar suas possíveis relações com o sistema térmico atmosférico. Os dados obtidos nesta estação serão

apresentados de forma dividida, a começar pelo monitoramento atmosférico e, em seguida, o monitoramento da temperatura da água.

7.2.3.2.1. Temperatura e umidade relativa do ar

As medidas de dispersão e tendência central da série completa de dados coletados de temperatura do ar na estação Rio III são apresentadas na Figura 7.22.



Figura 7.22 – Séries simplificadas da temperatura do ar na estação Rio III, com medidas de dispersão – máxima e mínima – e de tendência central – moda – para o período entre 1º de abril de 2009 e 31 de março de 2010

O monitoramento na estação Rio III foi realizado entre os dias 1º de abril e 12 de dezembro de 2009, quando, então, o instrumento parou de funcionar. As fortes chuvas que incidiram sobre a região a partir do final de novembro alagaram a galeria do rio de modo que o instrumento, que havia sido checado para manutenção no dia 23 de novembro, só pôde ser recuperado no dia 16 de fevereiro/2010. Seu aspecto evidenciava que a galeria havia sido alagada até sobrepor a altura do instrumento, submergindo-o completamente – embora estivesse instalado a uma altura de aproximadamente 1,2 m em relação ao nível habitual de água do rio. Na ocasião o instrumento foi enviado para a assistência técnica, não retornando até o término do período de monitoramento.

As mínimas atingidas no período chegaram a 17,3 °C no dia 4 de junho/2009, às 9:00 h, embora a temperatura tenha permanecido baixa neste ponto nas horas anteriores a esta mínima, na casa de 17,4 °C entre 5h 30min e 8h 30min. Quanto ao

extremo oposto, a maior máxima registrada foi uma temperatura de 20,2 °C no dia 4 de julho, às 18h 30min. Este mesmo extremo foi registrado em outras estações de monitoramento, e será comentado mais adiante, na análise da dinâmica atmosférica da caverna de Santana. Excetuando-se este valor, a máxima registrada foi de 19,3 °C. As amplitudes térmicas diárias foram de grandezas inferiores a 1 °C. Visualmente em gráfico, a temperatura do ar desta estação aparenta possuir correlação com a temperatura do ar externa nas mínimas registradas.

Considerando a série completa de temperatura do ar nesta estação, a média anual foi de 18,28 °C, a moda 18,1 °C e a mediana 18,2 °C. A amplitude térmica anual foi de 2,9 °C – considerando-se o valor extremo de 20,2 °C para as máximas – e de 2 °C – sem considerar o valor em questão. Não houve variabilidade hídrica nesta estação, de modo que todas as medidas de dispersão e tendência central foram iguais a 99,9% em todo o período monitorado.

O tratamento de suavização dos dados da estação Rio III, feito por meio da média móvel, bem como seu respectivo gráfico de resíduos, tem seus resultados apresentados na Figura 7.23.

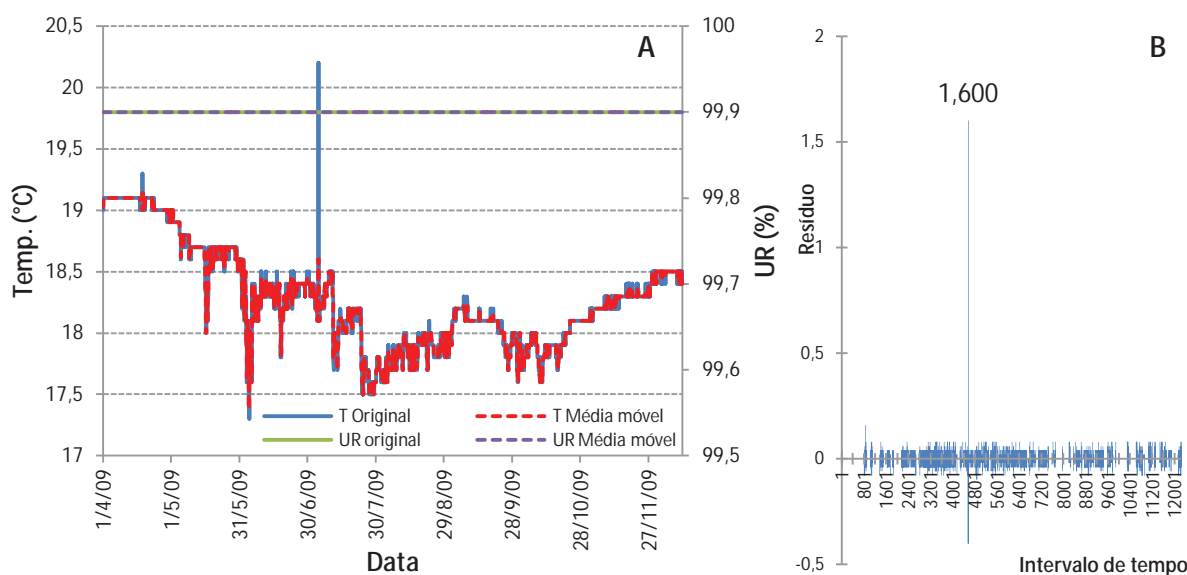


Figura 7.23 – Séries originais de T e UR, suas médias móveis (A) e respectivo gráfico de resíduos da suavização da série original x média móvel (B), na estação Rio III, para o período entre 1º de abril e 11 de dezembro/2009

A série suavizada não ilustra grandes discrepâncias em relação à série original de dados (Figura 7.23A), evidenciando a inexistência de interferências antrópicas neste ponto da caverna. A única exceção que destoa do comportamento geral da temperatura nesta estação de monitoramento ocorre no dia 4 de julho, em

evento de origem desconhecida já observado na Figura 7.22. Este gera grande resíduo em relação ao padrão identificado, o que se observa na Figura 7.23B.

Para a umidade relativa do ar, o monitoramento apresentou valor constante de 99,9% em todo o período considerado. Este mesmo padrão se repetiu nas demais estações no interior da caverna, razão pela qual as análises de média móvel para este parâmetro não será realizada nas futuras estações. Na continuidade, os resultados das funções de autocorrelação e densidade espectral para os dados da estação Rio III são apresentados na Figura 7.24.

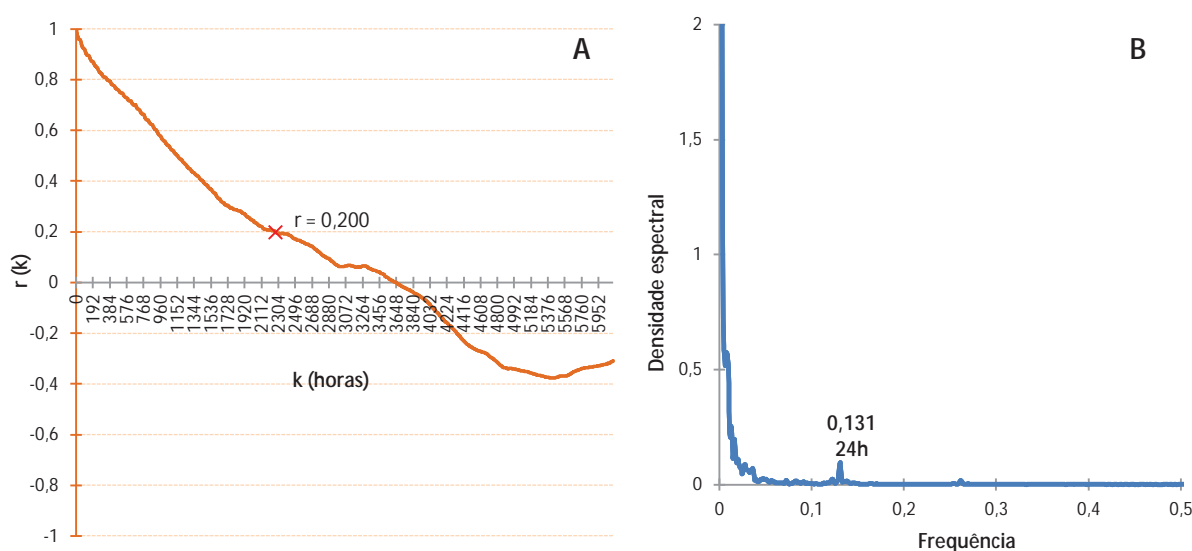


Figura 7.24 – Funções de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série de temperatura do ar da estação Rio III

A análise da estação rio III foi aplicada a uma série de 6120h (255 dias). A função de autocorrelação (Figura 7.24A) apresenta um decrescimento lento, evidenciando menor dinâmica atmosférica neste ponto do sistema. O efeito de memória é atingido após 2266h (94,41 dias), quando r é igual a 0,2. Por sua vez, a densidade espectral (Figura 7.24B) ilustra que a frequência de corte é muito baixa neste ponto do sistema, permitindo apenas a visualização de um ciclo de 24h de baixa densidade espectral.

7.2.3.2.2. Temperatura da água

A apresentação dos dados resultantes do monitoramento da temperatura da água se inicia com as medidas de dispersão e tendência central da série coletada, apresentadas na Figura 7.25.

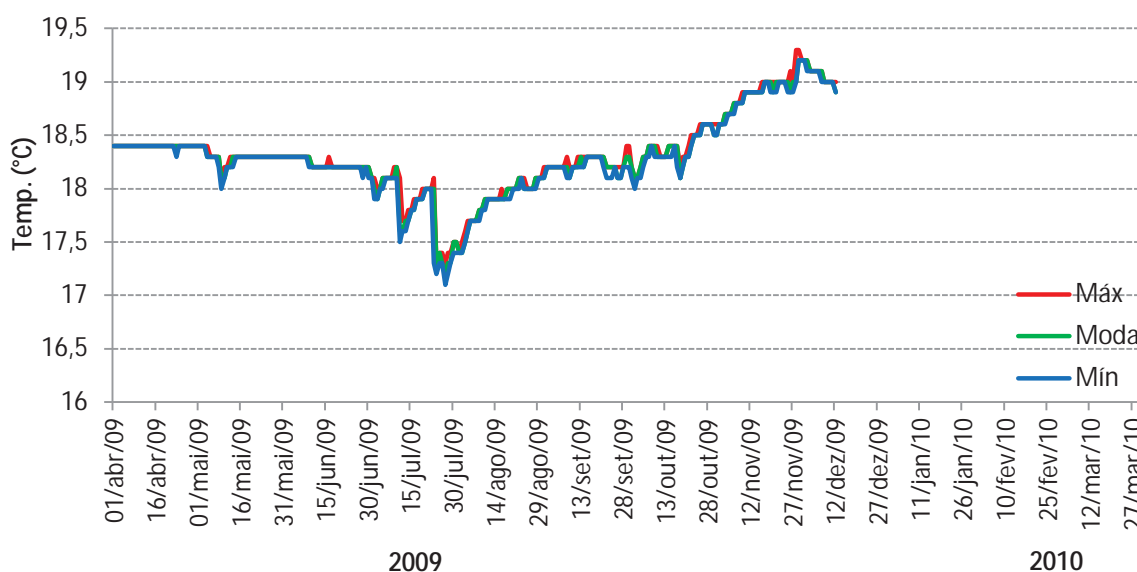


Figura 7.25 – Séries simplificadas da temperatura da água na estação Rio III, com medidas de dispersão – máxima e mínima – e de tendência central – moda – para o período entre 1º de abril de 2009 e 31 de março de 2010

A temperatura da água apresentou suas mínimas no mês de julho/2009, com vales chegando à casa dos 17 °C. O período mais frio foi registrado no dia 27 de julho/2009, com a temperatura atingindo 17,1 °C entre 5h e 15h 30min. No extremo oposto, as máximas atingidas se incidiram no mês de novembro, chegando a 19,3 °C entre as 16h do dia 28 e as 4h do dia 29. A amplitude térmica diária, na maioria dos dias, é igual a zero. O único valor excepcional foi registrado no dia 27 de julho/2009, chegando a 0,8 °C. Na escala diária de análise, as máximas, mínimas e a moda correspondem, na maioria das vezes, ao mesmo valor.

A variação da temperatura no período de 8 meses e 11 dias também foi pequena, evidenciando grande estabilidade térmica na água. A amplitude térmica no período foi de 2,2 °C. A média da temperatura foi de 18,29 °C, enquanto a moda e a mediana foram de 18,3 °C.

A série de dados da temperatura da água também foi tratada por meio de técnicas estatísticas para séries temporais. A Figura 7.26 ilustra os resultados da média móvel e da função de autocorrelação.

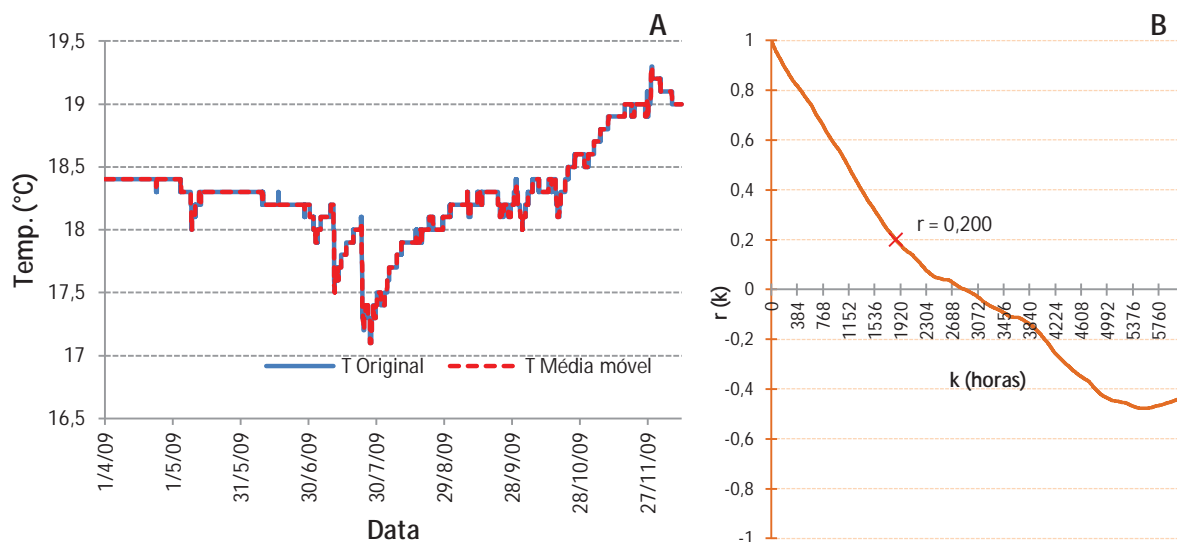


Figura 7.26 – Série original de T da água e média móvel (A), na estação Rio III, para o período entre 1º de abril e 11 de dezembro/2009, e respectiva função de autocorrelação (B)

Para a análise da temperatura da água, foi considerada uma série de 6120h (255 dias). A suavização da série não gerou grandes discrepâncias de valores em relação aos dados originais coletados (Figura 7.26A). Mesmo nos dias de maior amplitude térmica, em julho/2009, os resíduos gerados não foram superiores a 0,1, ilustrando que as variações ocorreram de maneira gradativa e lenta. A função de autocorrelação (Figura 7.26B) fornece suporte para esta afirmação, ao apresentar um sistema de baixa dinâmica relativa de troca – comparada com a dinâmica atmosférica de outros pontos da galeria do rio –, com efeito de memória de 1851h (77,12 dias). Por outro lado, a dinâmica da água é mais elevada que a do ar neste ponto da caverna, conforme função de autocorrelação da temperatura do ar, apresentada na Figura 7.24A.

7.2.4. Monitoramento da zona de baixa amplitude térmica

A zona termoclimática de baixa amplitude térmica apresenta as primeiras estratificações verticais dentro do monitoramento realizado. As zonas anteriormente analisadas e suas respectivas estações correspondiam ao nível atual de base do sistema cárstico Pérolas-Santana, tendo o rio Roncador como seu exutório.

Na zona em questão, foram instaladas quatro estações de monitoramento, três delas no quarto nível (contados de cima para baixo) de galerias superiores, sendo este um dos mais afetados pela visitação turística, e uma no terceiro nível de galerias.

A primeira estação de monitoramento foi instalada no salão Fafá, no quarto nível superior de galerias, logo após o pequeno trecho de transposição entre a galeria do rio (quinto nível) e a galeria superior turística (quarto nível). Sua distância em relação ao meio externo é de aproximadamente 210 m, e sua altura em relação ao rio de aproximadamente 20 m. O salão faz a junção entre o corredor aberto à visitação turística – que se desenvolve a sudoeste a partir do salão – e a galeria do rio Verde, em sentido oposto, a nordeste.

Na continuidade, a próxima estação foi instalada no salão Cristo, que corresponde a um pequeno trecho remanescente do terceiro nível superior de galerias. Sua distância em relação ao meio externo é de aproximadamente 280 m, a uma altura de 30 m em relação ao nível do rio. Trata-se de um pequeno salão terminal, ao fundo de uma galeria.

A terceira estação instalada nesta zona termoclimática se localizou no salão do Encontro, no quarto nível de galerias, a uma distância de aproximadamente 250 m em relação ao meio externo – não se considerando a distância percorrida no circuito turístico, mas sim, o eixo principal de ligação entre o ponto e o meio externo por entre as conexões de galerias existentes. O salão está localizado a uma altura de aproximadamente 25 m em relação ao nível do rio Roncador, sendo ponto de conexão para diversos trechos da caverna, como a galeria do rio, os níveis superiores mais altos e o salão das Flores, entre outros.

Por fim, a estação Escada, localizada no final do trecho aberto à visitação do quarto nível de galerias, na transição com o quinto nível, a galeria do rio. Sua distância em relação ao meio externo é de aproximadamente 270 m, e sua altura em relação ao nível do rio de aproximadamente 15 m. A posição relativa destes pontos na zona de baixa amplitude térmica é apresentada na Figura 7.27.



Figura 7.27 – Localização das estações de monitoramento da zona termoclimática de baixa amplitude térmica

7.2.4.1. Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Fafá

O instrumento instalado na estação Fafá apresentou falhas em seu funcionamento nos períodos inicial e final da pesquisa. Com isso, o monitoramento pôde ser realizado no período entre 29 de maio/2009 e 17 de janeiro/2010. As séries simplificadas de temperatura, com máximas, mínimas e moda diária são apresentadas na Figura 7.28.

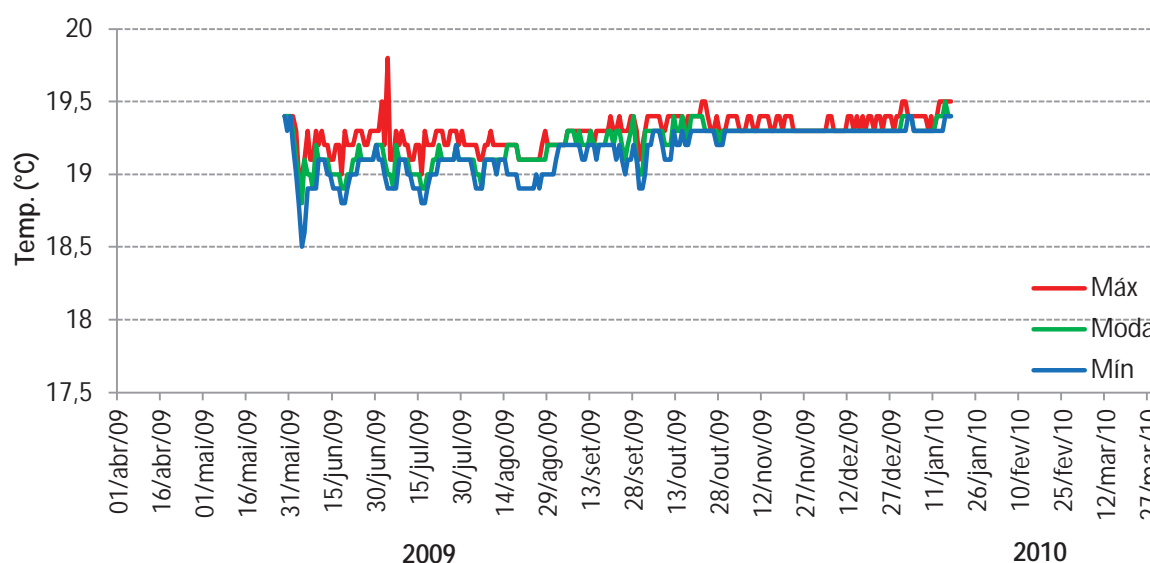


Figura 7.28 – Séries simplificadas da temperatura do ar na estação Fafá, com medidas de dispersão – máxima e mínima – e de tendência central – moda – para o período entre 29 de maio de 2009 e 17 de janeiro de 2010

A visualização em gráfico das séries simplificadas de dados coletadas na estação Fafá evidenciam grande relação com os ciclos atmosféricos das zonas termoclimáticas e transicional. Assim como nos pontos localizados na galeria do rio, a menor mínima do período, de 18,5 °C, foi registrada no dia 4 de junho/2009, se iniciando às 8h 30min – com um atraso de duas horas em relação às estações Boca, Rio I e Rio II – e se estendendo até às 10h 30min. Por sua vez, a maior máxima foi registrada no dia 4 de julho/2009, variando entre 19,8 °C e 19,6 °C entre 16h 30min e 17h, repetindo o fenômeno atmosférico detectado em outras estações – em especial na estação Rio III. Excetuando-se esta excepcionalidade, esta estação apresentou outras máximas em julho, outubro, dezembro/2009 e janeiro/2010 de 19,5 °C.

A média anual da temperatura nesta estação foi de 19,21 °C, a moda 19,1 °C e a mediana 19,6 °C, com amplitude térmica anual de 3,6 °C. A umidade relativa do ar foi constante em 99,9% durante todo o período monitorado.

Dando continuidade às análises, realizou-se a suavização da série coletada de temperatura do ar, de forma a verificar possíveis discrepâncias e/ou interferências nos dados. Os resultados são apresentados na Figura 7.29.

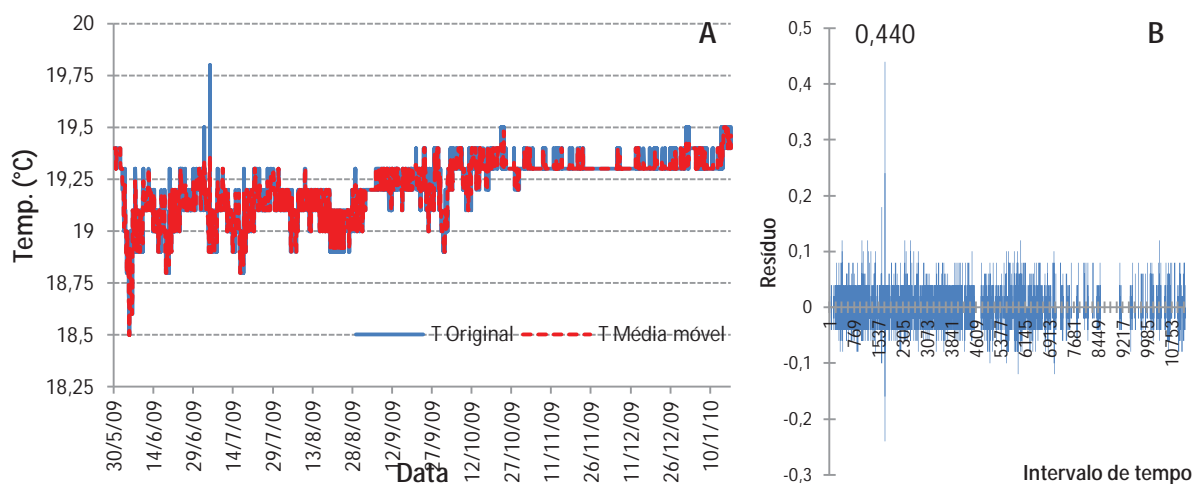


Figura 7.29 – Série original de T e médias móveis correspondentes (A) e respectivo gráfico de resíduos da suavização da série original x média móvel (B), na estação Fafá, para o período entre 29 de maio de 2009 e 17 de janeiro de 2010

As médias móveis demonstram a inexistência de grandes variações repentinas de maior amplitude na série analisada, de um modo geral (Figura 7.29A). Exceção feita ao episódio do dia 4 de junho/2009, que gerou um resíduo de 0,440 (Figura 7.29B), demonstrando perda momentânea de uniformidade no padrão geral de variação atmosférica da estação. Outros diversos valores de resíduos, da ordem de 0,1, podem ser observados na Figura 7.29B. No entanto, a existência de resíduos tanto na escala positiva quanto na negativa sugere que tais variações façam parte do padrão atmosférico deste ponto do sistema, não se caracterizando como interferência antrópica. Esta interpretação é corroborada pelas funções de autocorrelação e densidade espectral (Figura 7.30), que evidenciam um padrão cíclico de variações na estação Fafá.

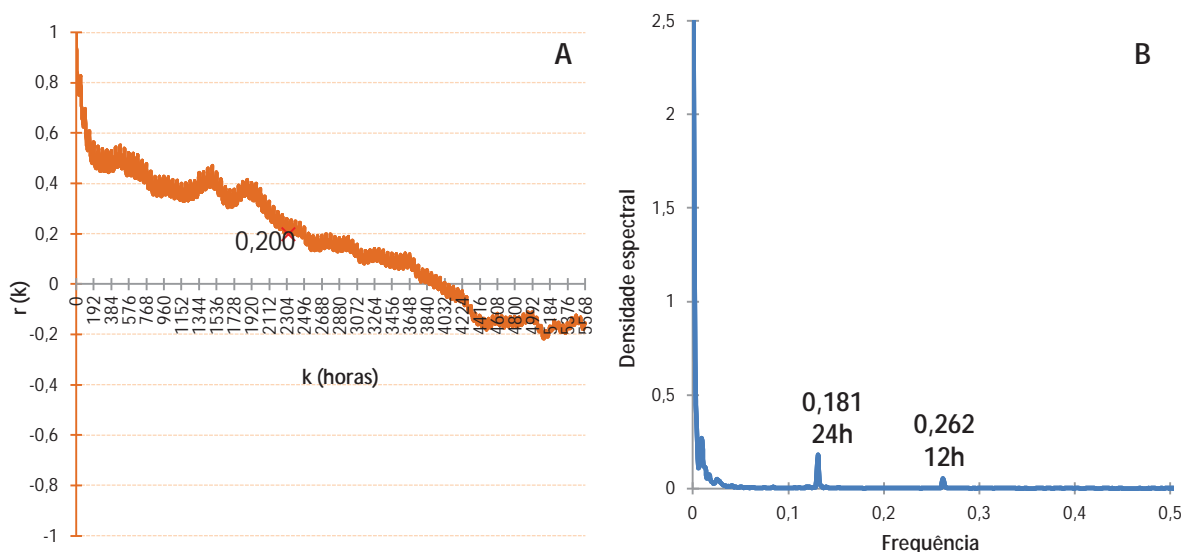


Figura 7.30 – Funções de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série de temperatura do ar da estação Fafá

Para a estação Fafá, foi considerada uma série de 5568h (232 dias). A função de autocorrelação (Figura 7.30A) ilustra a existência de um padrão de variação diuturna na estação Fafá, acompanhando os ritmos sazonais identificados nas estações Externa, Boca, Rio I e Rio III. O efeito de memória é de 2319h (96,62 dias), quando r é igual a 0,2. Na função de densidade espectral (Figura 7.30B), identificam-se ciclos diários de 12h e diurnos de 24h – mesmo que em densidades espectrais muito baixas. A existência de outros fenômenos cíclicos neste ponto é indicada pelo pico de maior densidade espectral em frequência próxima a zero.

7.2.4.2. *Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Cristo*

A estação de monitoramento Cristo localiza-se a 280 m do ambiente externo, em um patamar mais elevado em relação ao quarto nível de galerias superiores, correspondendo, provavelmente, a outro nível de galerias fósseis, ora chamado de terceiro nível de galerias superiores.

A estação apresentou diversos problemas sistemáticos com os instrumentos nela instalados. Com isso, os dados dos primeiros três meses apresentaram valores da ordem de 29 °C – 30 °C, o que suscitou suspeita sobre a fidelidade da medição. Esta foi pesquisada por meio do instrumento de precisão Testo 435, que apontou valores em grandezas inferiores em 10 °C aos dados monitorados. Desta forma, os dados dos meses abril a junho/2009 foram totalmente descartados dos resultados considerados. Durante os meses de julho a setembro/2009, outros instrumentos

foram testados – mas os dados também não puderam ser aproveitados, pelas constantes discontinuidades nos resultados –, até que em outubro/2009, foi restabelecido o monitoramento desta estação. No entanto, a excessiva umidade do ar gerou novo problema no instrumento, tirando-o de operação entre os meses de dezembro/2009 e janeiro/2010. Assim, a Figura 7.31 apresenta os resultados dos monitoramentos possíveis de serem realizados.

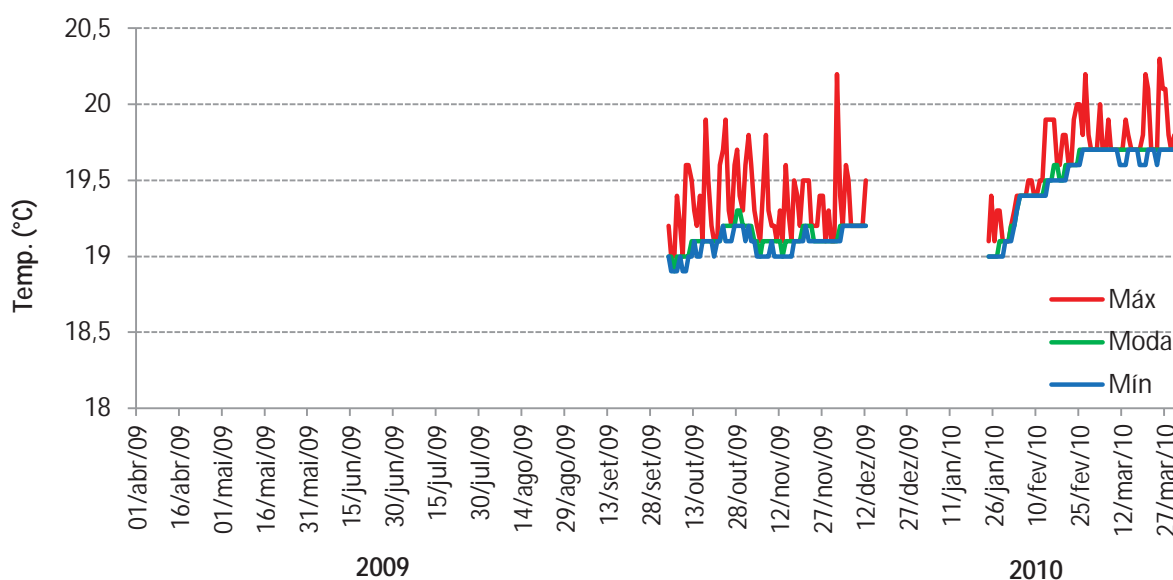


Figura 7.31 – Séries simplificadas da temperatura do ar na estação Cristo, com medidas de dispersão – máxima e mínima – e de tendência central – moda – para o período entre 4 de outubro de 2009 e 31 de março de 2010

Embora os dados tenham sido registrados em apenas dois curtos períodos – 4 de outubro a 12 de dezembro/2009 e 24 de janeiro a 31 de março/2010 –, os resultados apresentaram um padrão totalmente diferente das demais estações, com variações consideráveis de ordem diária e até mesmo horária. As mínimas atingidas 18,9 °C, apenas no mês de outubro. Por sua vez, os picos de máximas ocorreram em todos os meses do monitoramento, com valores entre 19,9 °C e 20,3 °C em diversos casos. Estes são superiores em quase 1 °C em relação à média (19,34 °C), moda (19,1 °C) e mediana (19,2 °C) anuais – grandeza esta muito próxima da amplitude térmica anual da estação, de 1,4 °C. Amplitudes térmicas diárias semelhantes foram registradas nos dias 7 de novembro (0,8 °C) e 2 de dezembro/2009 (1,1 °C).

Para continuar a análise, a Figura 7.32 apresenta os gráficos com as séries originais, respectivas médias móveis e os gráficos de resíduos dos dois períodos de dados registrados nesta estação.

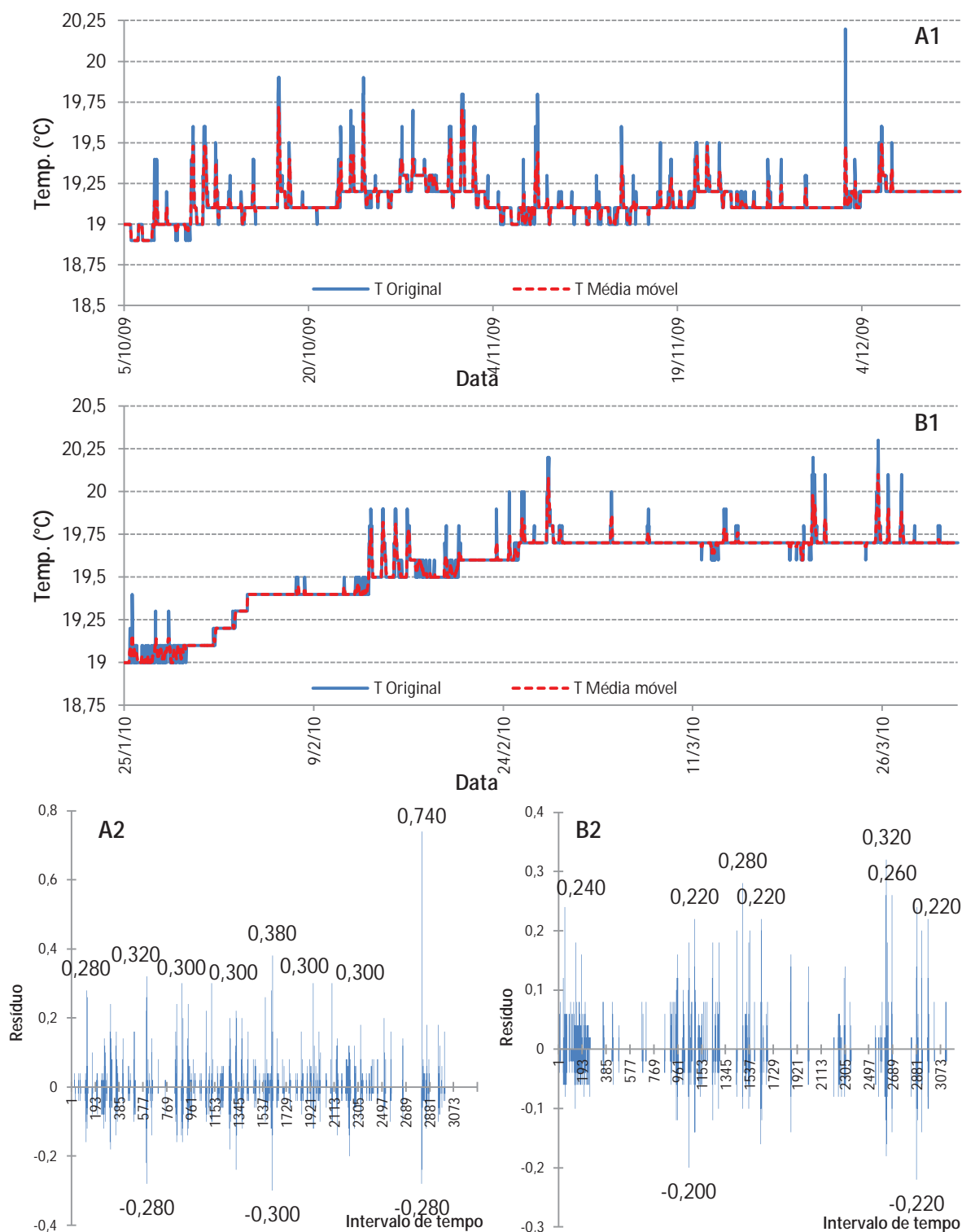


Figura 7.32 – Série original de T e médias móveis correspondentes (A1 e B1) e respectivos gráficos de resíduos da suavização da série original x média móvel (A2 e B2), na estação Cristo, para os períodos entre 5 de outubro e 11 de dezembro de 2009 (A1-2) e 25 de janeiro e 31 de março de 2010 (B1-2)

Os gráficos evidenciam fortes ocorrências de valores anômalos em relação à série suavizada, primeiramente por meio das médias móveis (Figura 7.32A1 e B1). Note-se que as grandes variações só ocorrem na forma de picos, o que destoa de um padrão de variação cíclica atmosférica, onde os vales de temperaturas mais baixas também se fariam presentes, seguindo os padrões das demais estações que apresentaram variações térmicas perceptíveis. Esta interpretação é reforçada pelos gráficos de resíduos (Figura 7.32A2 e B2), onde se observa, por consequência, um predomínio de resíduos na escala positiva, atingindo, em A2, valores da ordem de 0,3 – com um extremo de 0,74 –, e em B2, da ordem de 0,2. Estas diferenças na intensidade dos resíduos entre A2 e B2 se observam também por meio da análise estatística das duas séries de forma separada, tal como apresentado na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Comparação das medidas de dispersão e tendência central da temperatura do ar em dois períodos monitorados na estação cristo

Medida Estatística	Período	
	5/10/2009 – 11/12/2009	25/01/2010 – 31/03/2010
Média	19,14°C	19,55°C
Mediana	19,1°C	19,7°C
Moda	19,1°C	19,7°C
Máxima	20,2°C	20,3°C
Mínima	18,9°C	19°C
Amplitude	1,3°C	1,3°C
Desvio padrão	0,113	0,222
Variância	0,013	0,049

As medidas listadas na Tabela 7.2 demonstram que o primeiro período foi mais frio que o segundo, se comparadas às medidas de tendência central de ambos. As diferenças nas máximas e nas mínimas não foram significativas. Com isso, e considerando a hipótese de impacto antrópico, pode-se dizer que os ambientes mais frios estão mais sujeitos ao incremento térmico pela presença humana, ao menos nas faixas de temperatura consideradas. As diferenças no desvio padrão e na variância se devem ao incremento térmico ocorrido nesta estação durante os meses de janeiro e fevereiro/2010, com a temperatura se ampliando gradativamente, em uma amplitude de 0,7 °C.

Estas mesmas séries foram analisadas pelas funções de autocorrelação e densidade espectral. Os resultados são apresentados nas Figuras 7.33 e 7.34.

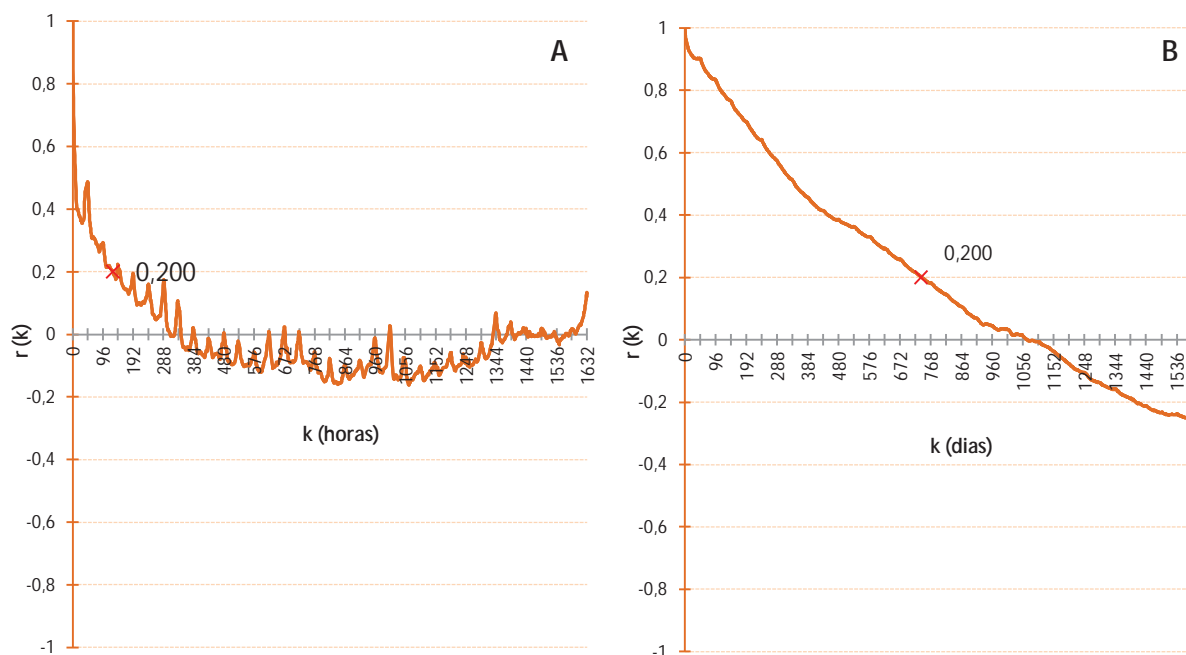


Figura 7.33 – Funções de autocorrelação para os períodos entre 5/10/2009 – 11/12/2009 (A) e entre 25/01/2010 – 31/03/2010 (B) na estação Cristo

As funções de autocorrelação ilustram a existência de padrões distintos em ambas as séries. No primeiro período, com um total de 1632h ou 68 dias (Figura 7.33A), percebe-se a existência de um padrão de ciclos, em períodos aproximados de 24h. O efeito de memória é de 127h (5,29 dias), bastante inferior ao identificado para a estação anterior, no salão Fafá (96,62 dias, Figura 7.30A). No segundo período, uma série com 1572h (Figura 7.33B), o padrão cíclico de 24h não é mais evidente. O efeito de memória é de 738h (30,75 dias), acima do observado em 7.33A, mas ainda inferior ao valor na estação Fafá. A Figura 7.34 apresenta as funções de densidade espectral, complementando a análise dos dados.

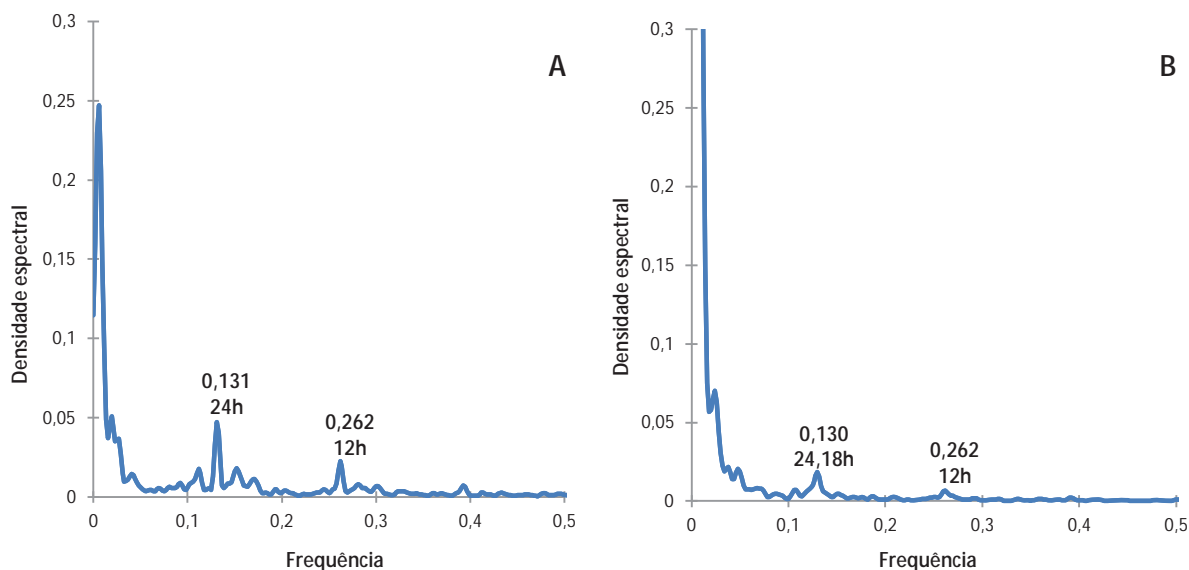


Figura 7.34 – Funções de densidade espectral para os períodos entre 5/10/2009 – 11/12/2009 (A) e entre 25/01/2010 – 31/03/2010 (B) na estação Cristo

Os gráficos da Figura 7.34 ilustram ciclos de 12h e 24h de baixa densidade espectral em ambas as séries, conferindo maior detalhe às análises de autocorrelação. Com isso, não se pode, em um primeiro momento, relacionar as alterações observadas neste trecho da caverna à presença humana, dado que uma componente sazonal de ciclo diurno também foi identificada. Por outro lado, o curto intervalo temporal considerado também não permite descartá-la. Além disso, na série 1, a densidade espectral para ambos os períodos apresentou valores maiores, evidenciando clara alteração nos padrões. Esta questão será debatida mais profundamente no Capítulo 8, quando da discussão dos resultados.

Todavia, permanecem levantadas as hipóteses de interferência antrópica nos parâmetros aferidos, bem como se levantam outras hipóteses iniciais para a compreensão da circulação atmosférica dentro da caverna de Santana, com um ponto de convergência térmica na região do salão do Cristo.

7.2.4.3. *Varição da temperatura do ar, da rocha e umidade relativa do ar na estação Encontro*

A terceira estação de monitoramento da zona termoclimática de baixa amplitude térmica foi instalada no salão do Encontro. Este se localiza no quarto nível de galerias superiores, a aproximadamente 250 m do meio externo. Nesta estação foram monitoradas a temperatura do ar, da rocha em um espeleotema tipo coluna e a umidade relativa do ar. Os dados coletados serão apresentados em subseções

separadas, se iniciando pelo monitoramento atmosférico e, em seguida, a temperatura da rocha.

7.2.4.3.1. Temperatura e umidade relativa do ar

A temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas no período entre 1º de abril/2009 e 31 de março/2010, com duas discontinuidades na série. A primeira delas, no mês de setembro/2009, corresponde a uma falha de memória do instrumento, já que seu funcionamento não foi interrompido. A segunda discontinuidade, entre o final de janeiro e o início de fevereiro/2010, se deu em função da necessidade de uma retirada do equipamento para calibração, devido ao excesso de umidade condensada em seu interior, na interface de leitura e no sensor capacitivo de aferição da temperatura. As séries simplificadas de temperatura do ar dos resultados obtidos são apresentadas na Figura 7.35.

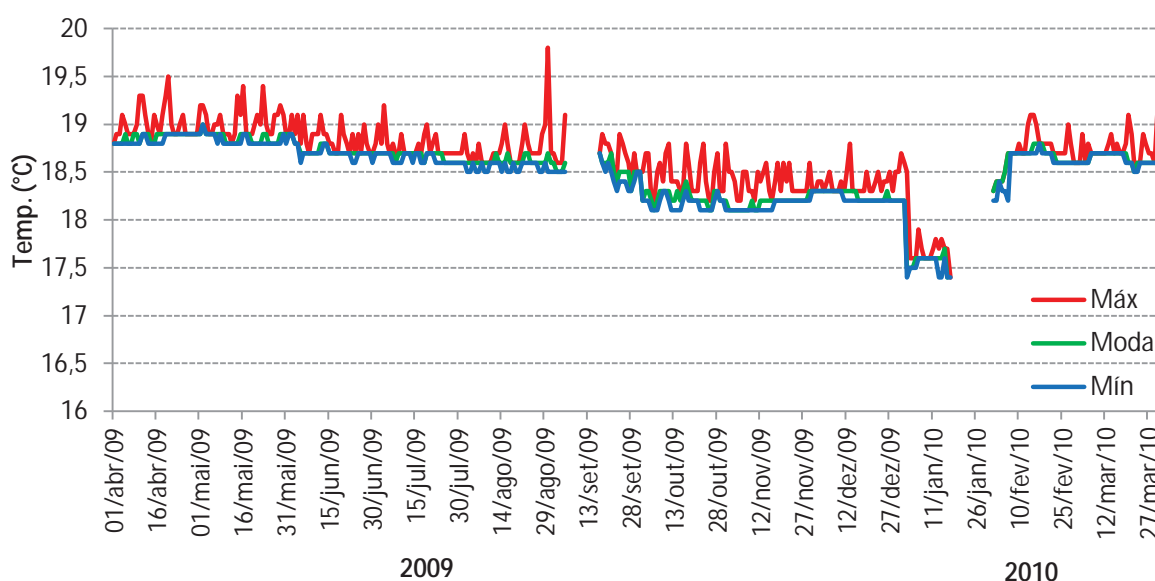


Figura 7.35 – Séries simplificadas da temperatura do ar na estação Encontro, com medidas de dispersão – máxima e mínima – e de tendência central – moda – para o período entre 1º de abril de 2009 e 31 de março de 2010

As séries apresentadas na Figura 7.35 ilustram a ocorrência de temperaturas mais frias nos meses de setembro a dezembro/2009, de forma bastante regular, com mínimas da ordem de 18,1 °C a 18,5 °C. Posteriormente, ocorreu no dia 2 de janeiro/2010, a partir das 11h, uma súbita queda na temperatura ambiente, atingindo mínimas entre 17,4 °C e 17,6 °C, até o dia 17 de janeiro/2010, quando o monitoramento foi paralisado. Ressalta-se que deste período até meados do final de

fevereiro/2010, ocorreu excepcional alagamento no quarto nível de galerias superiores, com destaque para o salão do Encontro (conforme já ilustrado no capítulo da metodologia). Desta forma, cogita-se a possibilidade da interferência das águas de percolação no resfriamento atmosférico do ambiente. Todavia, independente da relação direta com a água, trata-se de qualquer forma de um fenômeno que suscita a curiosidade, pelo resfriamento do ambiente em 1,1 °C em um período de tempo inferior a uma hora. Nos demais meses, as mínimas diárias giraram em torno dos 18,7 °C.

Sobre as máximas diárias, assim como na estação Cristo, diversos picos de aumento de temperatura ocorreram ao longo de toda a série de dados. As amplitudes diárias destes picos chegaram à grandeza de 1 °C – com um valor excepcional de 1,3 °C em 30 de agosto/2009. Estes dados serão analisados com maior detalhe por meio das médias móveis, gráficos de resíduos e função de autocorrelação.

De um modo geral, a média anual da temperatura do ar na estação encontro foi de 18,53 °C, enquanto a moda e a mediana foram, respectivamente, de 18,7 °C e 18,6 °C. A amplitude anual foi de 2,4 °C, com mínima de 17,4 °C e máxima de 19,8 °C. Não houve variabilidade hídrica nesta estação, com os resultados da umidade relativa do ar constantes em 99,9% durante todo o monitoramento.

Para a análise das médias móveis, foi selecionado o trecho da série correspondente ao período entre 1° de abril e 4 de setembro/2009. Os resultados, em conjunto com os respectivos resíduos, são apresentados na Figura 7.36.

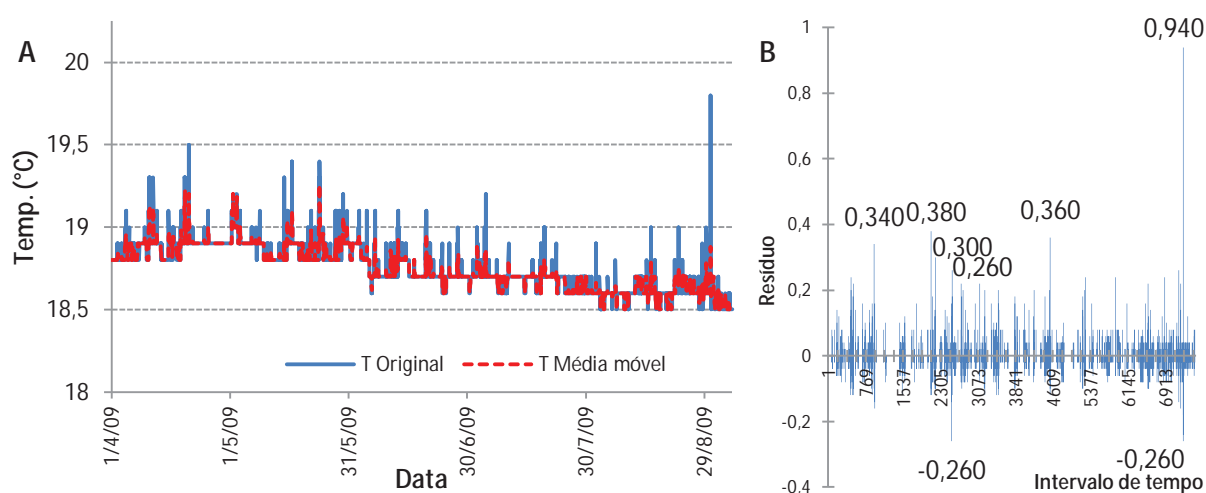


Figura 7.36 – Série original de temperatura do ar e médias móveis correspondentes (A) e respectivo gráfico de resíduos da suavização da série original x média móvel (B), na estação Encontro, para o período entre 1° de abril e 4 de setembro de 2009

A série suavizada de médias móveis ilustra diversas discrepâncias em relação à série original de dados (Figura 7.36A). Estas ocorrem apenas em relação aos picos, o que reflete diretamente no gráfico de resíduos (Figura 7.36B), com valores consideráveis na escala positiva. Tal como na estação Cristo, este comportamento em gráfico permite a formulação de hipóteses sobre impactos da presença humana neste ponto da caverna.

Na continuidade, é apresentada a função de autocorrelação da série seleccionada, na Figura 7.37.

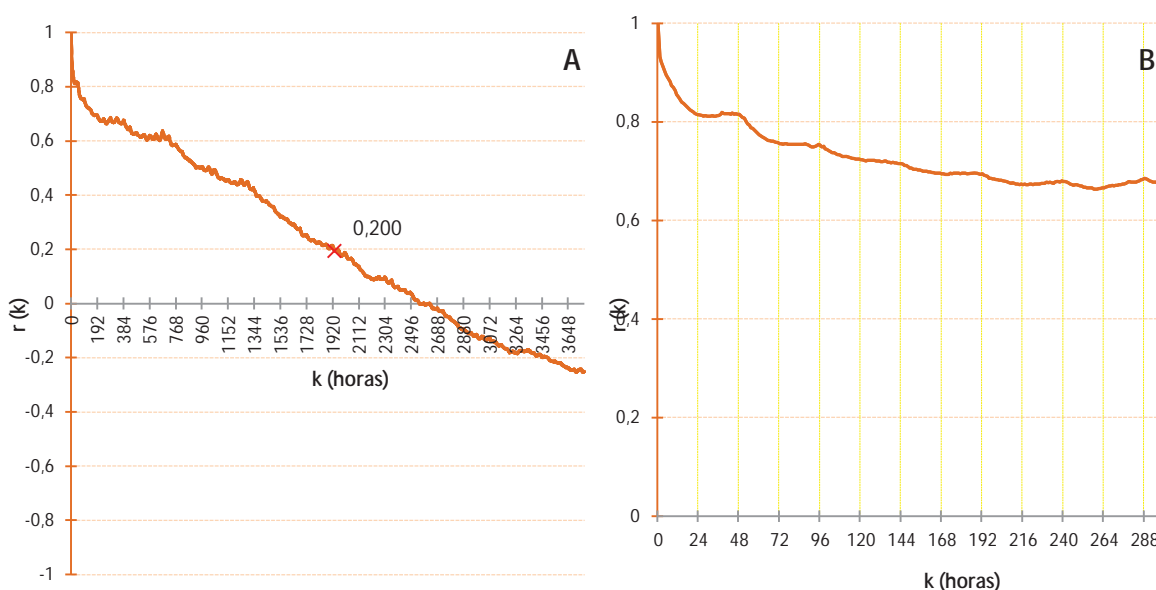


Figura 7.37 – Função de autocorrelação (A) e respectivo detalhe (B) da série de temperatura do ar da estação Encontro

A função de autocorrelação (Figura 7.37A) ilustra, como em outras estações, uma tendência temporal decrescente na série de 3768h (157 dias) seleccionada. O efeito de memória identificado é de 1929h (80,37 dias), valor bastante coerente com a tendência identificada para estações mais interiorizadas na caverna. Percebe-se ainda uma componente sazonal em gráfico, o que fica mais evidente no recorte temporal de aproximadamente 144 dias, ilustrado na Figura 7.37B – demarcados pelos eixos amarelos verticais. Esta variação, bastante tênue, também pode ser notada na função de densidade espectral (Figura 7.38).

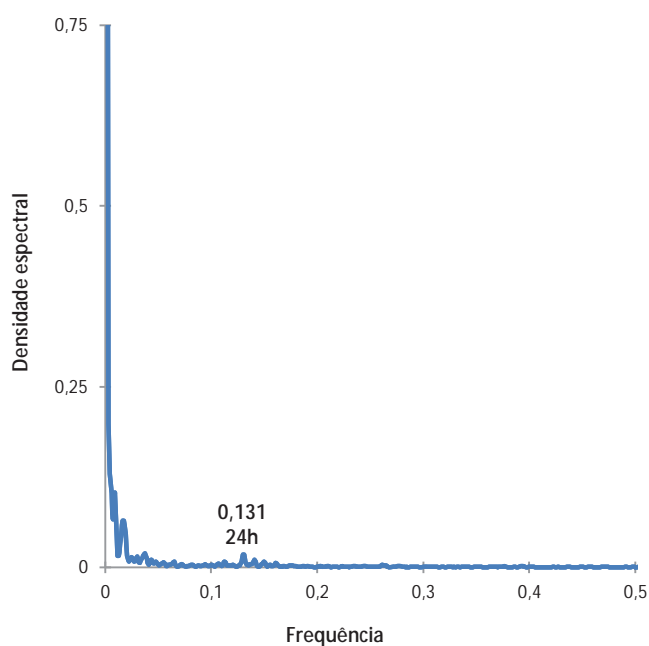


Figura 7.38 – Função de densidade espectral da série de temperatura do ar da estação Encontro

A frequência de corte da série selecionada é bastante baixa, ilustrando o ciclo diuturno de 24h apenas em densidades espectrais próximas a zero (Figura 7.38). A existência de um pico secundário na série pode evidenciar a interferência de fenômenos externos, o que denotaria relação com os resíduos apresentados na Figura 7.36B.

7.2.4.3.2. *Temperatura da superfície de rocha*

O monitoramento da temperatura da rocha foi feito entre os dias 1º de abril/2009 e 17 de janeiro/2010, sendo uma das séries mais longas obtidas nesta fase da pesquisa. A interrupção ocorrida no mês de setembro nos dados de temperatura e umidade relativa do ar nesta mesma estação não se repetiu na temperatura da rocha, o que manteve o registro de dados temporalmente uniforme. No dia 22 de janeiro/2010, o instrumento foi levado para manutenção, retornando ao funcionamento no dia 1º de fevereiro/2010. As séries simplificadas resultantes deste monitoramento são apresentadas na Figura 7.39.

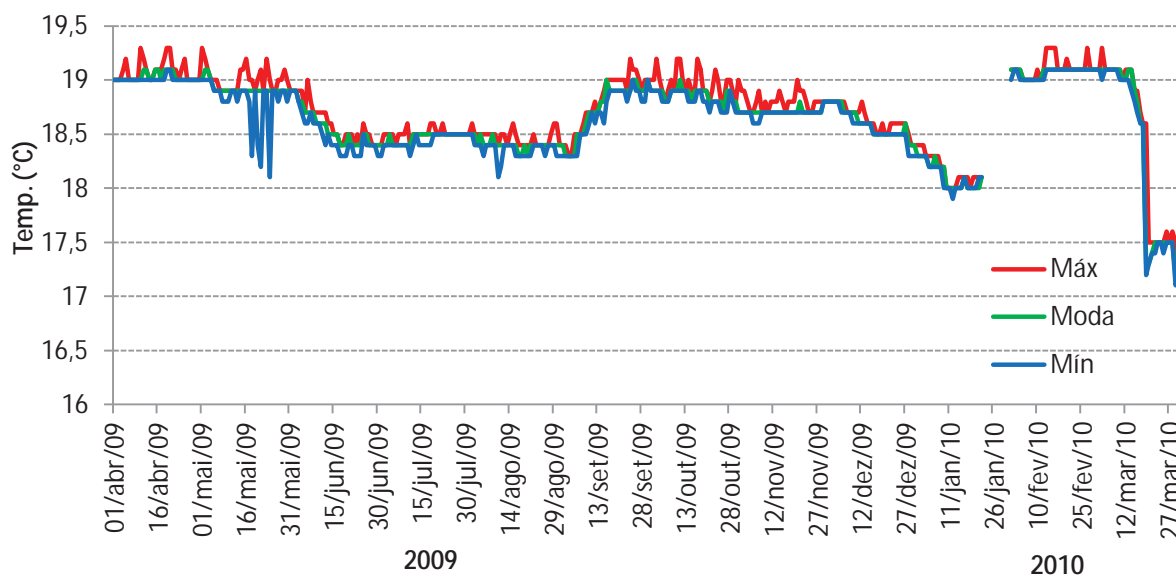


Figura 7.39 – Séries simplificadas da temperatura da superfície de rocha na estação Encontro, com medidas de dispersão – máxima e mínima – e de tendência central – moda – para o período entre 1º de abril de 2009 e 31 de março de 2010

A temperatura da rocha aferida em um espeleotema tipo coluna na estação Encontro apresentou uma amplitude anual de 2,2 °C – próxima da amplitude anual do ar, de 2,4 °C. As maiores amplitudes diárias foram registradas em maio/2009, atingindo 0,9 °C nos dias 21 e 24; e no dia 19 de março/2010, chegando a 1,4 °C. Estes extremos possuem relação direta com as mínimas diárias, que chegaram a 18,1 °C – 18,4 °C entre os dias 18 e 24 de maio/2009 – com quatro vales expressivos, evidenciados na Figura 7.39 – e a valores entre 17,1 °C e 17,5 °C em todos os dias no período entre 19 e 31 de março/2010. Estes valores contrastam significativamente com a média (18,66 °C), a mediana (18,7 °C) e a moda (18,9 °C) anuais, considerando os padrões de variabilidade desta estação. Em relação às máximas diárias, diversos picos podem ser observados, principalmente nos meses de temperaturas habitualmente mais elevadas. Com isso, amplitudes da ordem de até 0,5 °C são registradas. Este padrão é muito semelhante ao identificado na temperatura do ar nesta estação e no Cristo. Para a umidade relativa do ar, não houve variação de nenhuma ordem, sendo registrado o valor constante de 99,9%.

Dada à existência de uma descontinuidade temporal na série anual, apenas o período mais extenso, entre 1º de abril/2009 e 21 de janeiro/2010 foi considerado para as estatísticas de séries temporais. A primeira análise, de suavização por médias móveis, e os respectivos resíduos gerados, são observados na Figura 7.40.

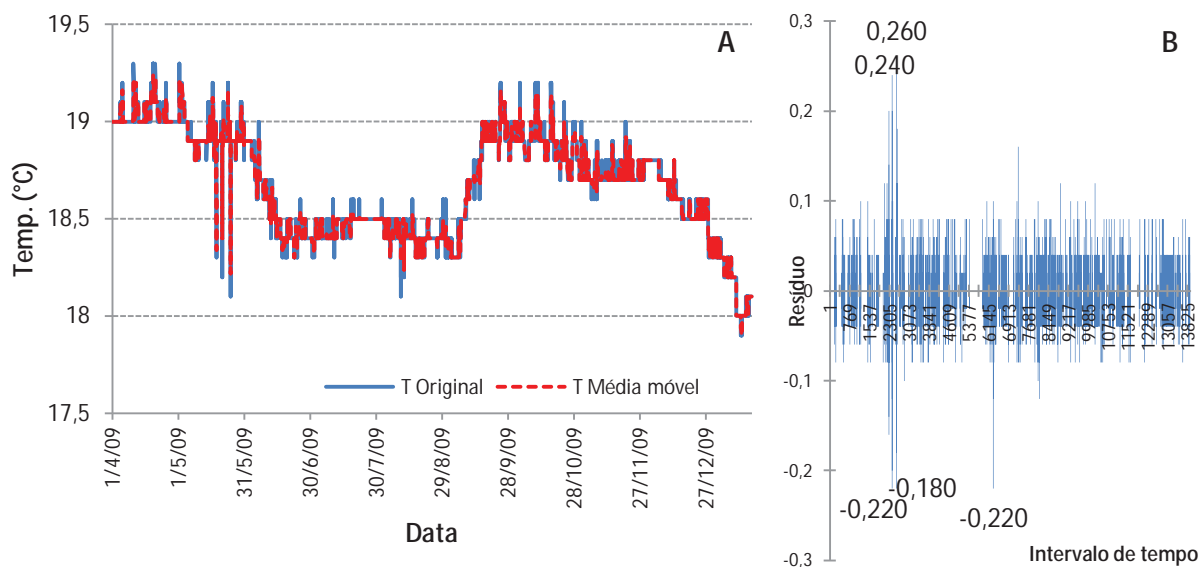


Figura 7.40 – Série original de temperatura da superfície de rocha e médias móveis correspondentes (A) e respectivo gráfico de resíduos da suavização da série original x média móvel (B), na estação Encontro, para o período entre 1º de abril de 2009 e 21 de janeiro de 2010

A suavização da série (Figura 7.40A) não apresentou grandes discrepâncias em relação aos dados originais, exceto pelos eventos extremos de baixa temperatura que já haviam sido detectados nas análises anteriores. No entanto, percebe-se pelo gráfico de resíduos (Figura 7.40B) uma tênue disparidade entre a intensidade e quantidade dos resíduos positivos em relação aos negativos. De um modo geral, esta pode estar ligada aos inúmeros picos de baixa amplitude detectados na Figura 7.39, em situação semelhante ao que foi observado na temperatura do ar nesta estação e no Cristo. Na subseção 7.4.1., estes dados serão analisados em conjunto, buscando identificar outras explicações sistêmicas para estes fenômenos, dado que um dos objetivos centrais do presente estudo é identificar a possível intensidade dos impactos da visitação na atmosfera subterrânea e, por consequência, nos espeleotemas, para estabelecer limites aceitáveis para a visitação.

Finalizando as análises desta estação, são apresentados os resultados das funções de autocorrelação e densidade espectral para a temperatura da rocha, na Figura 7.41.

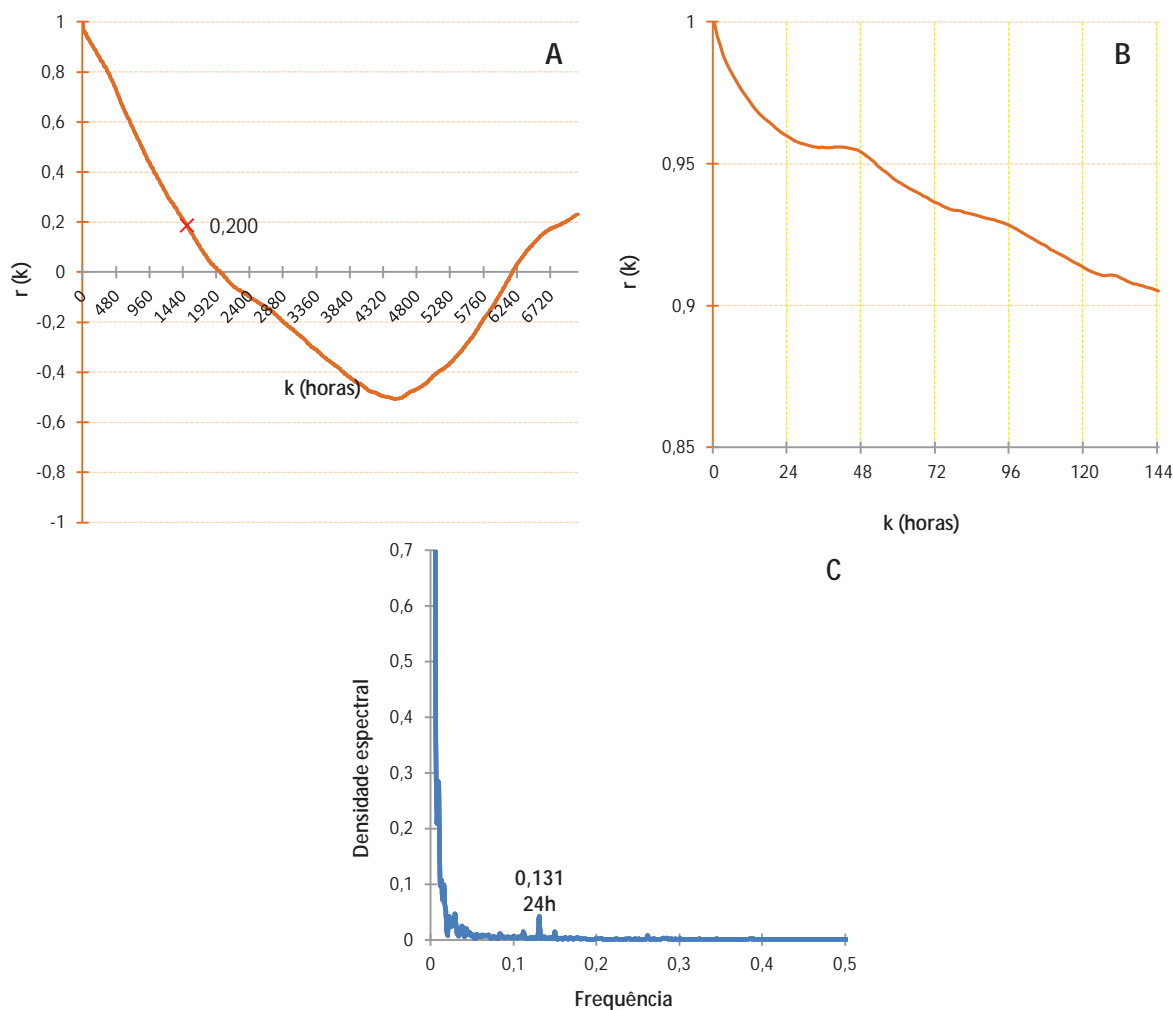


Figura 7.41 – Funções de autocorrelação, completa (A) e em detalhe (B), e de densidade espectral (C) da série de temperatura da superfície de rocha da estação Encontro

Para as análises temporais, foi selecionada uma série de 7128h (297 dias). O efeito de memória identificado na função de autocorrelação (Figura 7.41A) é de 1455h (60,62 dias), quando o coeficiente r atinge o valor 0,2. No mesmo gráfico, percebe-se tênue variação sazonal na série, o que pode ser mais bem visualizado em sua ampliação parcial (Figura 7.41B), em um recorte de 144 horas. Nele percebe-se um padrão de ciclo diuturno, demarcados pelos eixos verticais, com vértices mínimos (24h) e máximos (48h) das parábolas da série.

A função de densidade espectral (Figura 7.41C) também ilustra esta variação, ainda que em valores da ordem de grandeza inferior a 0,5. Com isso, o ciclo diuturno se evidencia também nos espeleotemas no salão do Encontro – a uma grande distância horizontal do acesso ao meio externo e sob uma capa de mais de 200 m de rocha em um eixo vertical –, demonstrando com isso a magnitude da influência do microclima externo no ambiente subterrâneo.

7.2.4.4. *Varição da temperatura e umidade relativa do ar na estação Escada*

A estação Escada corresponde ao último ponto de monitoramento na zona termoclimática de baixa amplitude térmica. Sua instalação foi feita no término do circuito turístico da caverna de Santana no âmbito do quarto nível de galerias, próximo à escada de acesso para o retorno à galeria do rio.

Nesta estação, durante todo o tempo foi testado um termohigrômetro da série Testostor 175. Apesar das inúmeras tentativas de ajuste do ponto de coleta e de calibração do instrumento – em campo e em laboratório –, os resultados obtidos foram totalmente inconsistentes, o que pode ser observado na Figura 7.42.

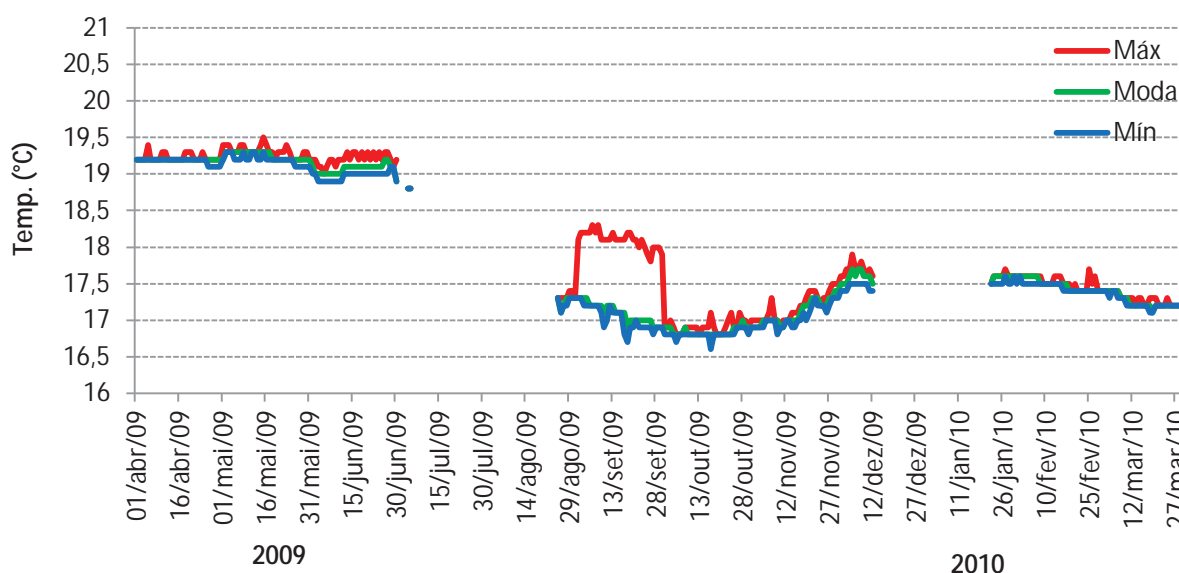


Figura 7.42 – Séries simplificadas da temperatura do ar na estação Escada, com medidas de dispersão – máxima e mínima – e de tendência central – moda – para o período entre 1º de abril de 2009 e 31 de março de 2010

As séries simplificadas da Figura 7.42 ilustram as disparidades dos períodos em que a coleta foi realizada, além das grandes falhas entre os dados, geradas por motivos como excesso de umidade no sensor, consumo excessivo de bateria e perda eventual de memória. Em alguns dias do mês de setembro/2009, a amplitude térmica foi superior a 1 °C, o que foge aos padrões observados nas demais estações da mesma zona. A amplitude térmica anual foi de 2,9 °C, com mínima de 16,6 °C em outubro/2009 e máxima de 19,5 °C em maio/2009. Ainda na análise anual, houve grande disparidade entre a média (17,88 °C) e a mediana (17,4 °C) em relação à moda (19,2 °C).

Em uma primeira análise, poderia se levantar a hipótese de que a estação poderia estar em um trecho da caverna a ser reclassificado no zoneamento, até por se encontrar na transição espacial com a zona interna típica, a uma distância de aproximadamente 30 m da estação Rio III. Esta hipótese foi preliminarmente investigada, por meio da análise de duas séries específicas de dados desta estação, apresentadas na Figura 7.43.

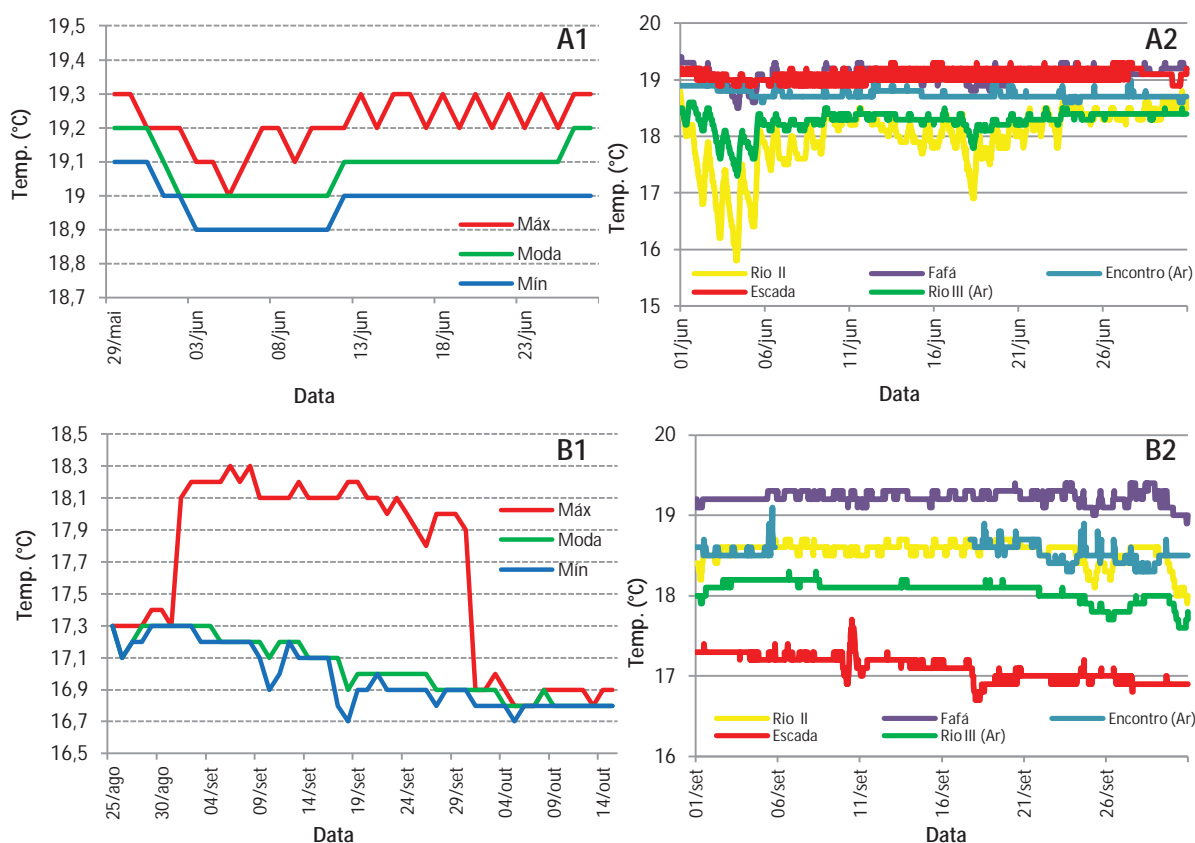


Figura 7.43 – Séries selecionadas de temperatura do ar na estação Escada: séries simplificadas (A1) e dados originais (A2) do mês de junho/2009; séries simplificadas do período entre 25 de agosto – 15 de outubro/2009 (B1) e destaque para os dados originais de setembro/2009 (B2)

As séries selecionadas demonstram grande disparidade nos padrões de variação dos meses de junho e setembro/2009, incomum até mesmo para uma estação de outra zona termoclimática. Em junho (Figura 7.43A1), note-se a variação diária nas máximas a partir do dia 13. Na Figura 7.43A2, observa-se que o padrão habitual da temperatura do ar neste ponto é muito semelhante às estações Fafá e Encontro, que se localizam no mesmo nível de galeria e zona termoclimática. Além disso, as variações ocorridas nas estações Rio II, Rio III e Fafá, nas temperaturas menores, refletem também na estação Escada.

Porém, a Figura 7.43B1 ilustra grande dilatação nas máximas no mês de setembro/2009, sem picos diários e sem alterações correspondentes nas mínimas ou na moda. Ao se observar a série original de dados do mês de setembro/2009 (Figura 7.43B2), percebe-se que o padrão habitual da temperatura do ar mudou completamente, se posicionando abaixo de todas as demais estações comparadas e sem apresentar mais nenhuma relação aparente com elas – muito embora se localize em ponto intermediário entre as demais estações.

Em função das inconsistências apresentadas, concluiu-se que o instrumento instalado nesta estação apresentou falhas durante o monitoramento, prejudicando a qualidade dos dados. Desta forma, os resultados do monitoramento desta estação não serão utilizados nas discussões e conclusões desta pesquisa, razão pela qual as análises estatísticas de séries temporais não foram a eles aplicadas.

7.2.5. Monitoramento da zona de temperatura estável

A zona termoclimática de temperaturas estáveis corresponde aos trechos de galerias mais distantes da área externa, bem como áreas isoladas, tais como salões ou até mesmo redes de condutos, que por razões morfológicas, apresentam baixo nível de troca gasosa com o ambiente externo ou com as demais áreas da caverna.

Na caverna de Santana, além das galerias superiores consideradas na presente pesquisa, é provável que trechos da galeria do rio em suas porções a montante do sistema também possam ser classificadas nesta zona, embora não tenham sido estudados em função do enfoque adotado.

No monitoramento exploratório, duas estações de monitoramento foram instaladas nesta zona. A primeira delas no salão dos Discos, localizada a aproximadamente 290 m do meio externo, no segundo nível de galerias superiores, a aproximadamente 45 m de altitude em relação ao nível do rio. A segunda estação se localizou no salão São Paulo, distante aproximadamente 460 m do meio externo, sendo o ponto de monitoramento mais remoto nesta fase. Localiza-se também no segundo nível de galerias superiores, a aproximadamente 42 m de altura em relação ao quinto nível, a galeria do rio Roncador. Ambas as estações se localizam em áreas fechadas à visitação turística.

A Figura 7.44 ilustra a posição relativa destas estações em relação ao trecho da caverna de Santana em destaque, que corresponde à zona de temperatura estável, com galerias e salões do primeiro, segundo e terceiro níveis de galerias.



Figura 7.44 – Localização das estações de monitoramento da zona termoclimática de temperatura estável

O monitoramento espeleoclimático na zona de temperatura estável apresentou diversos problemas, todos ocasionados pelas falhas contínuas nos instrumentos da série Testostor 175. Os resultados obtidos são detalhados por estação nas próximas subseções.

7.2.5.1. Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Discos

A estação Discos se localizou em um dos pontos mais altos deste salão, que possui uma morfologia bastante verticalizada, correspondendo a um ponto de ligação entre três níveis de galerias, além de salões intermediários menores.

Nos primeiros oito meses de pesquisa, diversos instrumentos foram testados nesta estação, tanto da série Testostor 175 quanto da série Testo 175-H1. Em todos os casos, foram constatadas falhas na leitura e registro de dados, ocasionadas por problemas como: consumo excessivo de baterias, excesso de umidade no sensor capacitivo de leitura e aferições incorretas, sem relação com os padrões esperados para uma área tão distante do meio externo. Uma comparação entre os dados de um mês com grande inconsistência (abril/2009) e outro dentro dos padrões esperados é apresentada na Figura 7.45.

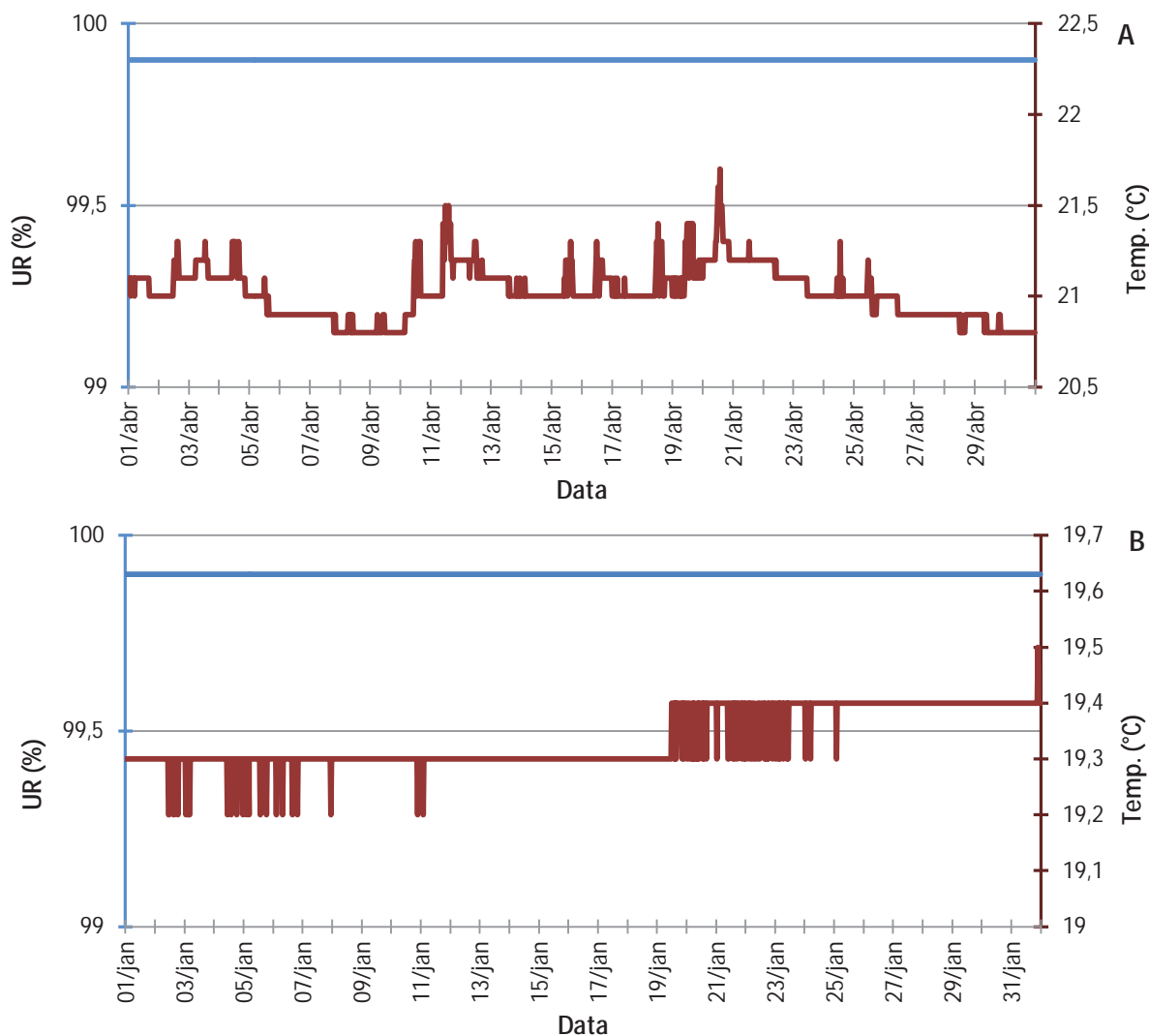


Figura 7.45 – Comparação de séries mensais de dados brutos de temperatura e umidade relativa do ar do mês de abril/2009 (A) e janeiro/2010 (B) na estação Discos

As séries ilustradas na Figura 7.45 demonstram padrões distintos de variações nos atributos climáticos aferidos. Em abril/2009, a mínima foi de 20,8 °C e a máxima de 21,7 °C, com amplitude mensal de 0,9 °C e diária de até 0,6 °C. A temperatura habitual mensal se situou 1,5 °C acima dos demais pontos monitorados da caverna. No mês de janeiro/2010, já com os sensores da série Testo 175-H2, o cenário registrado foi bem diferente. A mínima registrada foi de 19,2 °C, enquanto que a máxima foi de 19,5 °C, com uma amplitude mensal de 0,3 °C e amplitudes diárias na casa de 0,1 °C, com um valor excepcional de 0,3 °C registrado. A temperatura habitual mensal se situou na casa dos 19,3 °C, muito próxima à estação fafá, outro ponto de habitual temperatura mais elevada na caverna de Santana.

Desta forma, e com base em perfil térmico feito com o instrumento de precisão Testo 435 – que confirmou as disparidades já apontadas anteriormente e

que será apresentado na seção 7.6 –, os dados descontínuos dos primeiros oito meses de monitoramento foram descartados para todas as análises desta estação. Com isso, a Figura 7.46 apresenta as séries simplificadas de temperatura do ar da estação discos, no período entre 13 de dezembro/2009 e 31 de março/2010.

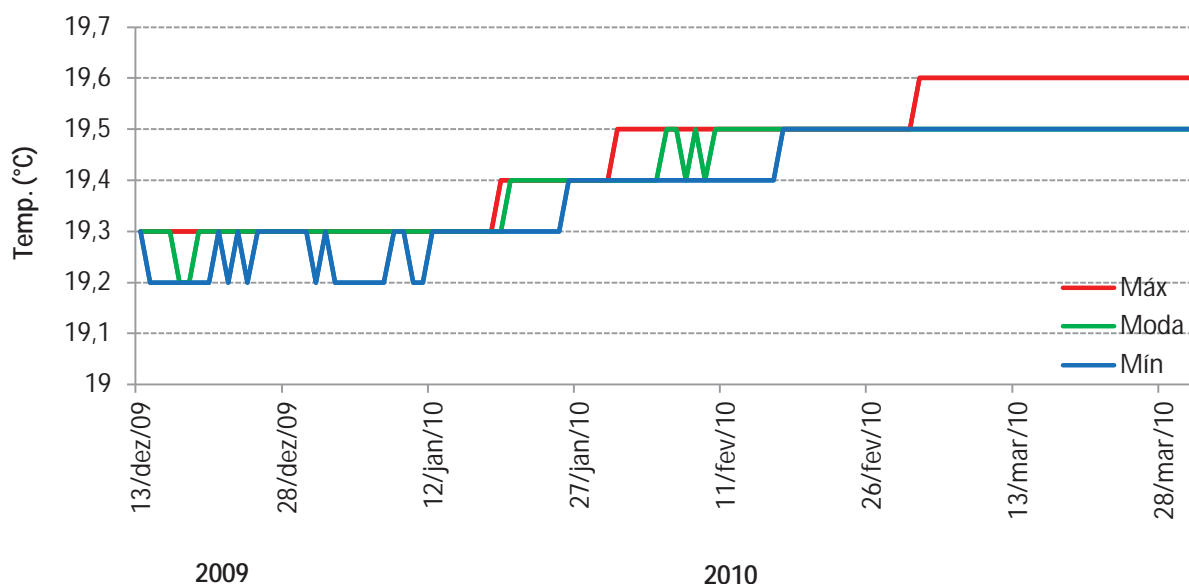


Figura 7.46 – Séries simplificadas da temperatura do ar na estação Discos, com medidas de dispersão – máxima e mínima – e de tendência central – moda – para o período entre 13 de dezembro de 2009 e 31 de março de 2010

As séries simplificadas da Figura 7.46 demonstram uma tendência geral de baixa amplitude térmica e temperaturas pouco variáveis em todo o período monitorado, bem como um padrão temporal crescente ao longo da série, sugerindo a existência de uma provável zona de acúmulo térmico na caverna de Santana. As mínimas do período foram de 19,2 °C, e as máximas de 19,6 °C – valor este que predominou nas máximas do mês de março/2010. A temperatura média do período foi de 19,41 °C, enquanto a moda e a mediana foram, respectivamente, 19,5 °C e 19,4 °C.

Na continuidade, a Figura 7.47 apresenta os dados originais e a suavização da série entre 14 de dezembro/2009 e 31 de março/2010.

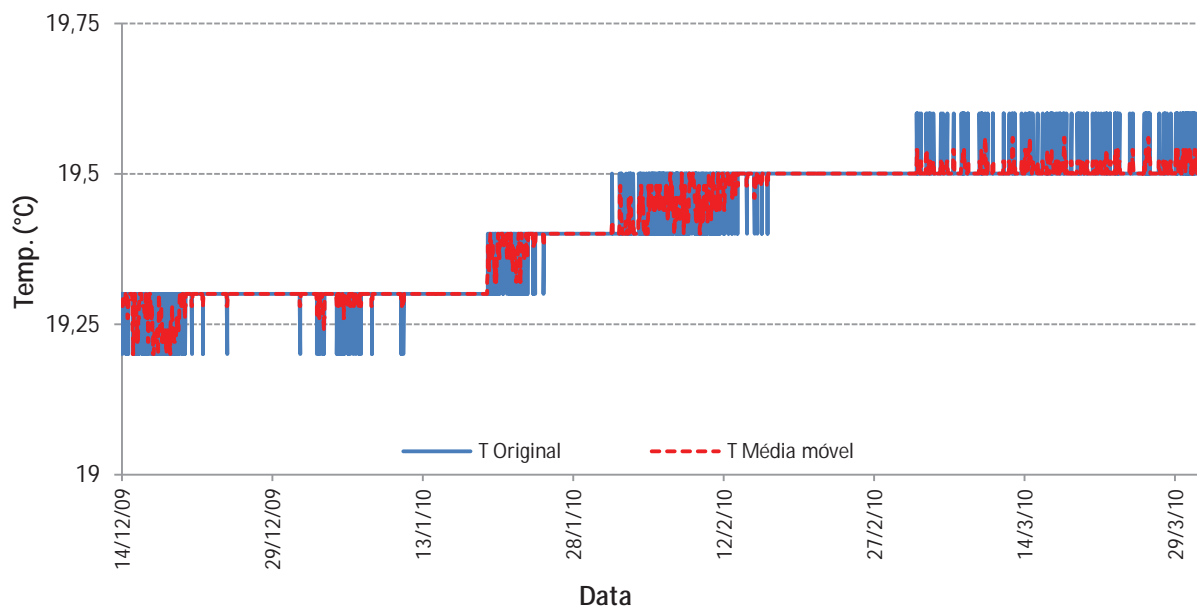


Figura 7.47 – Séries simplificadas da temperatura do ar na estação Discos, com medidas de dispersão – máxima e mínima – e de tendência central – moda – para o período entre 14 de dezembro de 2009 e 31 de março de 2010

A série suavizada por meio das médias móveis não apresenta grandes disparidades em relação à série original de dados, confirmando mais uma vez a grande estabilidade deste ponto do sistema. Os resíduos se situaram no intervalo entre 0,1 e -0,1, não justificando sua apresentação em gráfico. Por fim, a Figura 7.48 ilustra as funções de autocorrelação e densidade espectral para a série selecionada.

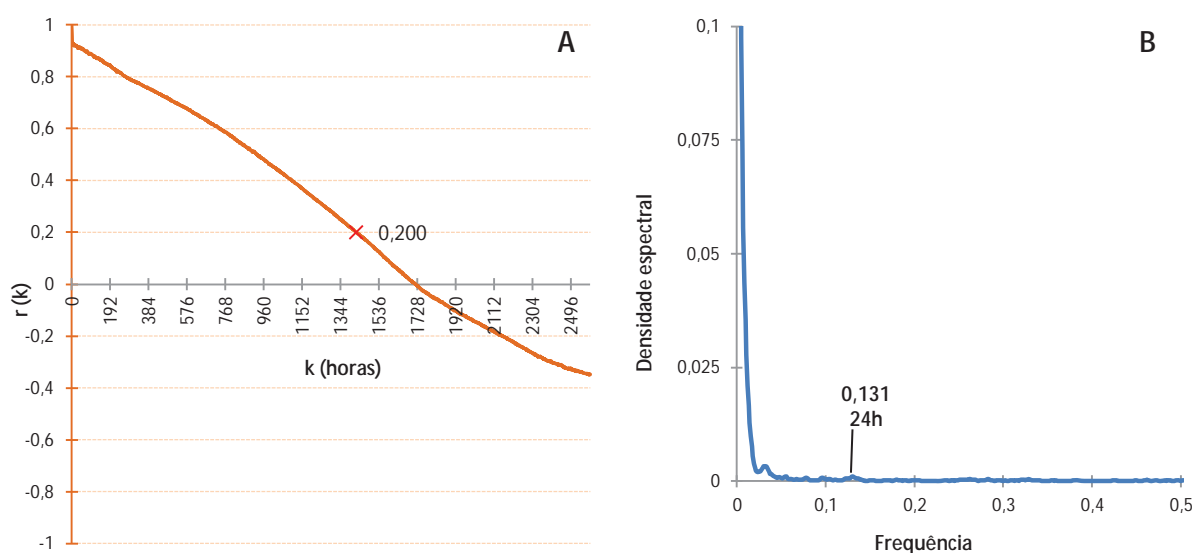


Figura 7.48 – Funções de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série selecionada na estação Discos

As funções foram aplicadas a uma série de 2592h (108 dias). A função de autocorrelação (Figura 7.48A) atingiu o valor de 0,2 em r em 1422h (59,25 dias),

apontando com isso o efeito de memória da série. A princípio, nenhuma componente sazonal pôde ser claramente observada. No entanto, a função de densidade espectral (7.48B) revelou uma componente cíclica de 24h de densidade próxima a zero, mas suficiente para ilustrar uma provável interferência do meio externo mesmo neste ponto da caverna de Santana.

7.2.5.2. *Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação São Paulo*

A estação São Paulo é a área mais remota do monitoramento espeleoclimático realizado nesta fase da pesquisa. A área está distante mais de 200 m do circuito de visitação, o que, em tese, impossibilita que os impactos da visitação a atinjam, não somente pela distância, mas pela complexidade da rede de galerias que a separa das galerias visitadas.

Durante todo o período de pesquisa, os sensores da série Testostor 175, instalados nesta estação, apresentaram problemas como consumo excessivo de baterias e falhas de leitura no sensor capacitivo, por conta da elevada umidade relativa do ar. Os resultados obtidos no monitoramento desta estação são apresentados na Figura 7.49.

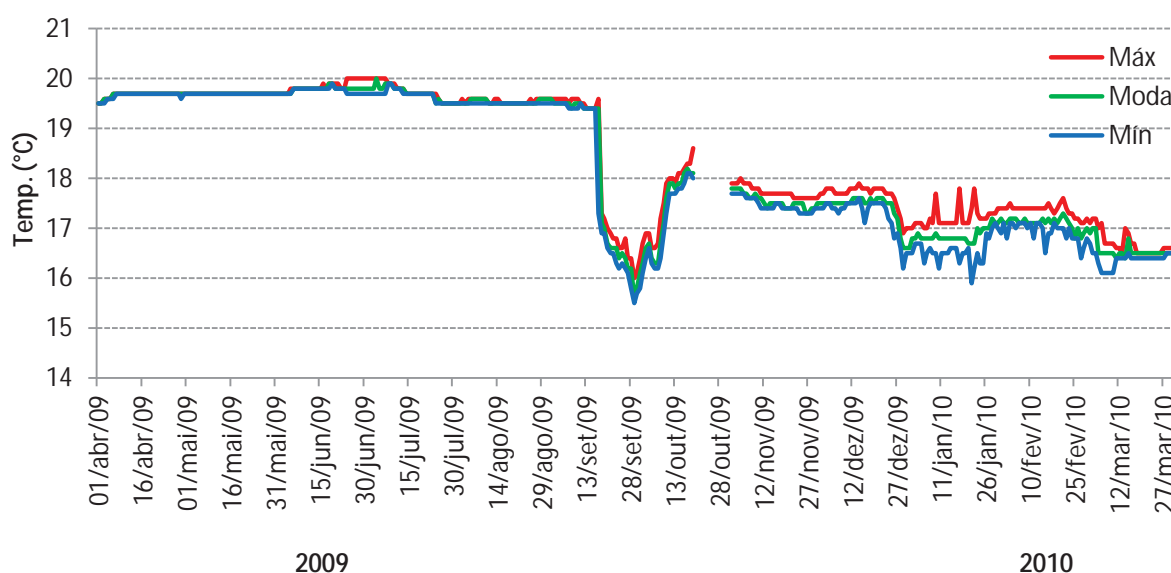


Figura 7.49 – Séries simplificadas da temperatura do ar na estação São Paulo, com medidas de dispersão – máxima e mínima – e de tendência central – moda – para o período entre 13 de dezembro de 2009 e 31 de març o de 2010

Os resultados apresentados na Figura 7.49 demonstram grande irregularidade na aferição dos dados da estação São Paulo, o que se observa, em menor escala, no mês de junho/2009, e de forma mais evidente a partir de setembro/2009. Os ciclos de variação diuturna, semanal e mensal não são compatíveis com a localização do salão São Paulo na caverna de Santana. Além da distância em relação ao meio externo, outros fatores precisam ser considerados nesta análise, como: a) a camada de rochas que separa as galerias superiores neste trecho da superfície, superior a 200 m de espessura; b) a inexistência de sinais de variação de magnitudes semelhantes em outras estações que seriam caminhos obrigatórios para a circulação atmosférica entre o salão São Paulo e o meio externo, como Discos ou Encontro, no quarto nível de galerias superiores, ou Rio III, na hipótese de comunicação pela galeria do rio via poço São Jorge. Além disso, no mês de março/2010 foi obtido novo instrumento da série Testo 175-H2, o qual foi instalado na estação São Paulo no dia 22 de março e permanecendo em funcionamento até o dia 9 de abril/2010, excedendo inclusive o período do monitoramento anual. O objetivo deste teste foi conferir a validade dos dados anuais, e seus resultados são apresentados na Figura 7.50.

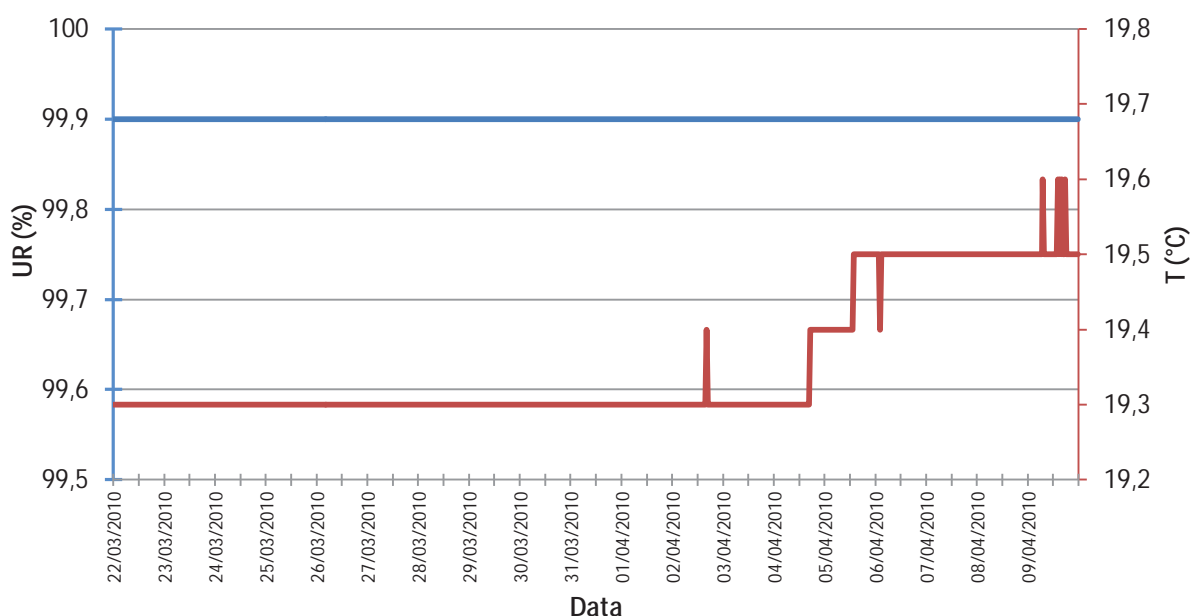


Figura 7.50 – Séries originais da temperatura e umidade relativa do ar na estação São Paulo, para o período entre 22 de março e 9 de abril de 2010

Embora o intervalo temporal considerado no experimento ilustrado no gráfico da Figura 7.50 tenha sido consideravelmente menor, totalizando 456 horas, fica

evidente a sua estabilidade atmosférica relativa. Os dados são compatíveis com o esperado para esta região da caverna, bem como com os padrões de variação identificados na estação Discos (Figuras 7.46 e 7.47). Para efeito de comparação entre as séries analisadas, a Tabela 7.3 apresenta a sua estatística descritiva.

Tabela 7.3 – Estatística descritiva das séries originais de dados das estações São Paulo e Discos

Medida	São Paulo (Original)	São Paulo (validação)	Discos (original)
Média	18,32 °C	19,35 °C	19,41 °C
Moda	19,7 °C	19,3 °C	19,5 °C
Mediana	17,9 °C	19,3 °C	19,4 °C
Máxima	20 °C	19,6 °C	19,6 °C
Mínima	15,5 °C	19,3 °C	19,2 °C
Amplitude	4,5 °C	0,3 °C	0,4 °C
Desv. padrão	1,34	0,08	0,09

Das diversas medidas apresentadas, chamam a atenção os extremos de dispersão, como a máxima de 20 °C da série anual da estação São Paulo em contraste com os 19,6 °C da série de validação e da estação Discos, ou a mínima, de 15,5 °C da série original contrastando com os 19,3 °C e 19,2 °C, respectivamente, da série de validação e da estação Discos. Estes valores geram uma amplitude térmica anual de 4,5 °C para a estação São Paulo no monitoramento anual. Naturalmente, são valores fora dos padrões possíveis para o trecho da caverna em questão.

Desta forma, os dados da estação São Paulo foram desconsiderados em sua totalidade, para efeito das análises posteriores deste estudo. De igual modo, os dados da série de validação não puderam ser aproveitados, em função do curto intervalo de tempo, incompatível com a extensão das demais séries. O tempo total de monitoramento é inferior até mesmo ao efeito de memória identificado para a estação anterior – Discos –, de modo a incompatibilizar a realização de análises comparativas consistentes.

7.3. Monitoramento trimestral em escala de detalhe no inverno de 2010

O monitoramento complementar feito no inverno de 2010 serviu para conferir maior detalhe aos estudos realizados no monitoramento anual. Para esta fase, foram instalados termohigrômetros nas estações: I) Externa; II) Boca; III) Rio 2; IV) Rio 3; V) Rio Verde (ao lado da antiga estação Fafá); VI) Cristo; 7) Encontro; 8) Flores; e 9) São Jorge. Destes, apenas os instrumentos das estações Externa, Boca, Rio 2, Rio

3, Rio Verde e Cristo funcionaram de acordo com o esperado, de modo que os dados das outras quatro estações não puderam ser recuperados. Esta situação foi prejudicial principalmente para o monitoramento da temperatura de superfície de rocha, que tinha sido ampliado de uma sonda na estação Encontro na fase anual para três sondas (uma no Encontro e duas no salão das Flores) na fase de detalhe. Desta forma, registra-se de antemão uma lacuna evidente nos estudos do sistema térmico da caverna de Santana, a ser preenchida por estudos futuros.

Por outro lado, os dados obtidos apresentam maior confiabilidade do que na fase anterior, considerando que: a) o intervalo de coleta foi diminuído, conferindo maior detalhe ao estudo. O total de registros por variável em cada estação foi elevado de 48 para 72; b) não houve problema nos instrumentos durante o processo de coleta, mantendo-a contínua em todas as estações. Este aspecto foi substancial para a qualidade dos dados, a qual, de certa forma, foi parcialmente prejudicada na coleta anual pelos constantes problemas causados pela umidade nos instrumentos de coleta.

Considerando que os pontos de coleta são os mesmos, nesta subseção não serão reapresentados os mapas de localização das estações de monitoramento, os quais podem ser observados na subseção 7.2.

Sobre a apresentação dos resultados de monitoramento higrotérmico, os gráficos das medidas de tendência central e dispersão utilizados na subseção 7.2 foram substituídos por gráficos das séries completas registradas, considerando a perspectiva de maior detalhe desta subseção.

7.3.1. Monitoramento da zona externa

7.3.1.1. Chuvas

Além do registro higrotérmico na estação externa, a fase de detalhe contou com o apoio dos dados de monitoramento das chuvas, feito pelo prof. Dr. José Antonio Ferrari, em pesquisa sobre a dinâmica hidrogeológica na região do rio Betari¹¹. Os dados foram obtidos em uma estação de monitoramento pluviométrico instalada na casa de pesquisas, a aproximadamente 400 m da estação Externa de monitoramento atmosférico. A Tabela 7.4 apresenta uma comparação entre a média de chuvas do período com a série histórica existente para a região.

¹¹ FERRARI, J.A. **A dinâmica da drenagem subterrânea nos planaltos cársticos do rio Betari, Vale do Ribeira – SP.** Projeto Fapesp 2009/05115-5. São Paulo, 2009.

Tabela 7.4 – Total acumulado de chuvas nos meses do inverno de 2010 em comparação com a média do período entre 1972-2004

MESES	TOTAL 2010 ¹ (mm)	MÉDIA 1972-2004 ² (mm)	DIFERENÇA (%)
Junho	52,0	82,39	-36,88
Julho	72,8	83,65	-13,92
Agosto	66,6	65,40	+1,83
Setembro	72,2	110,80	-34,83
Acumulado (período)	263,6	342,24	-22,97

¹ Ferrari (2009); ² DAEE (2010).

Em geral, o total de chuvas dos meses de junho-setembro de 2010 foi menor do que as médias históricas do período para a região, em 22,97% considerando o acumulado do período. O único mês próximo as médias foi o de agosto. Este resultado corrobora a interpretação dos dados históricos de chuva na subseção 7.2, onde, apesar da inexistência de dados atuais para o período de 2009, foi concluído que se tratava de um ano de chuvas atípicas, o qual poderia ser seguido, nos anos seguintes, por uma diminuição substancial das chuvas.

Dos meses considerados nesta análise, a Figura 7.51 apresenta em gráfico as chuvas diárias para o período entre 26 de junho e 30 de setembro de 2010.

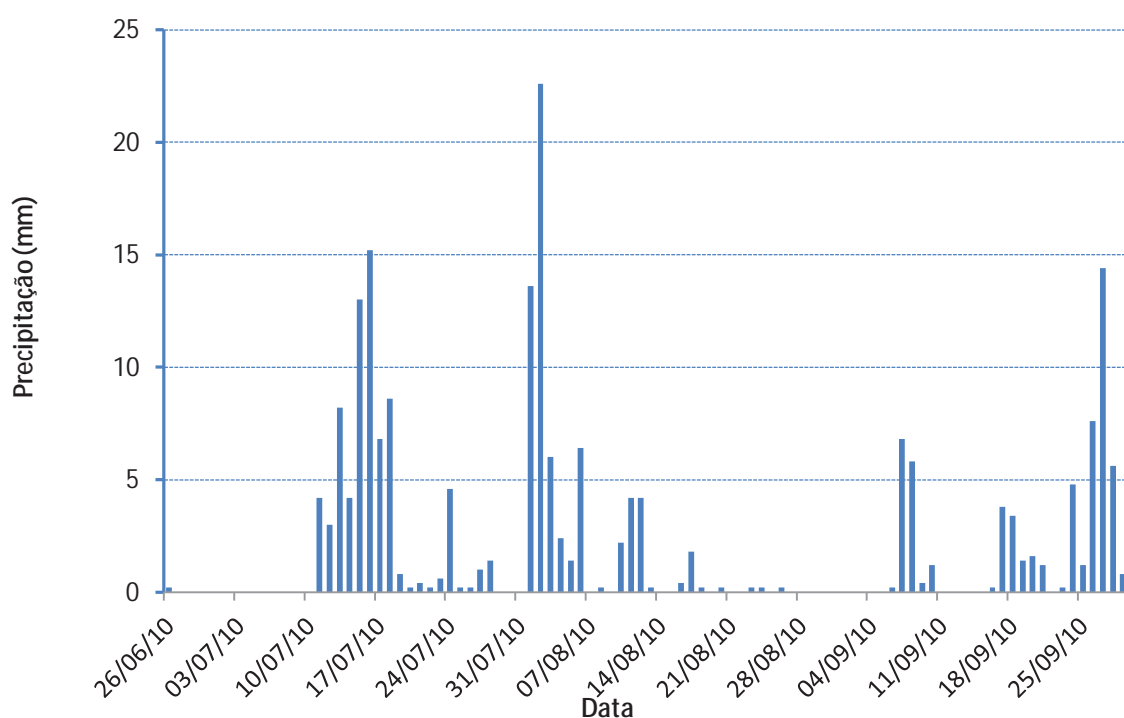


Figura 7.51 – Histograma da chuva diária no inverno de 2010 na região da caverna de Santana

Dentro do período estudado, o mês de junho foi o mais seco. No mês de julho, o dia 16 apresentou chuvas excepcionais para o período, atingindo 15,2 mm.

Todavia, o maior acumulado diário ocorreu no dia 02 de agosto, com um total de 22,6 mm. No mês de setembro a distribuição da chuva foi um pouco mais uniforme (desvio padrão da série de 4,05 em setembro, contra 4,61 para julho e 5,82 para agosto), com uma máxima de 14,4 mm no dia 27.

7.3.1.2. Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Externa

O monitoramento higrotérmico da estação externa, focado no microclima de fundo de vale nas adjacências da ressurgência do Rio Roncador, na caverna de Santana, funcionou durante todo o período monitorado. Os resultados gerais são demonstrados na Figura 7.52.

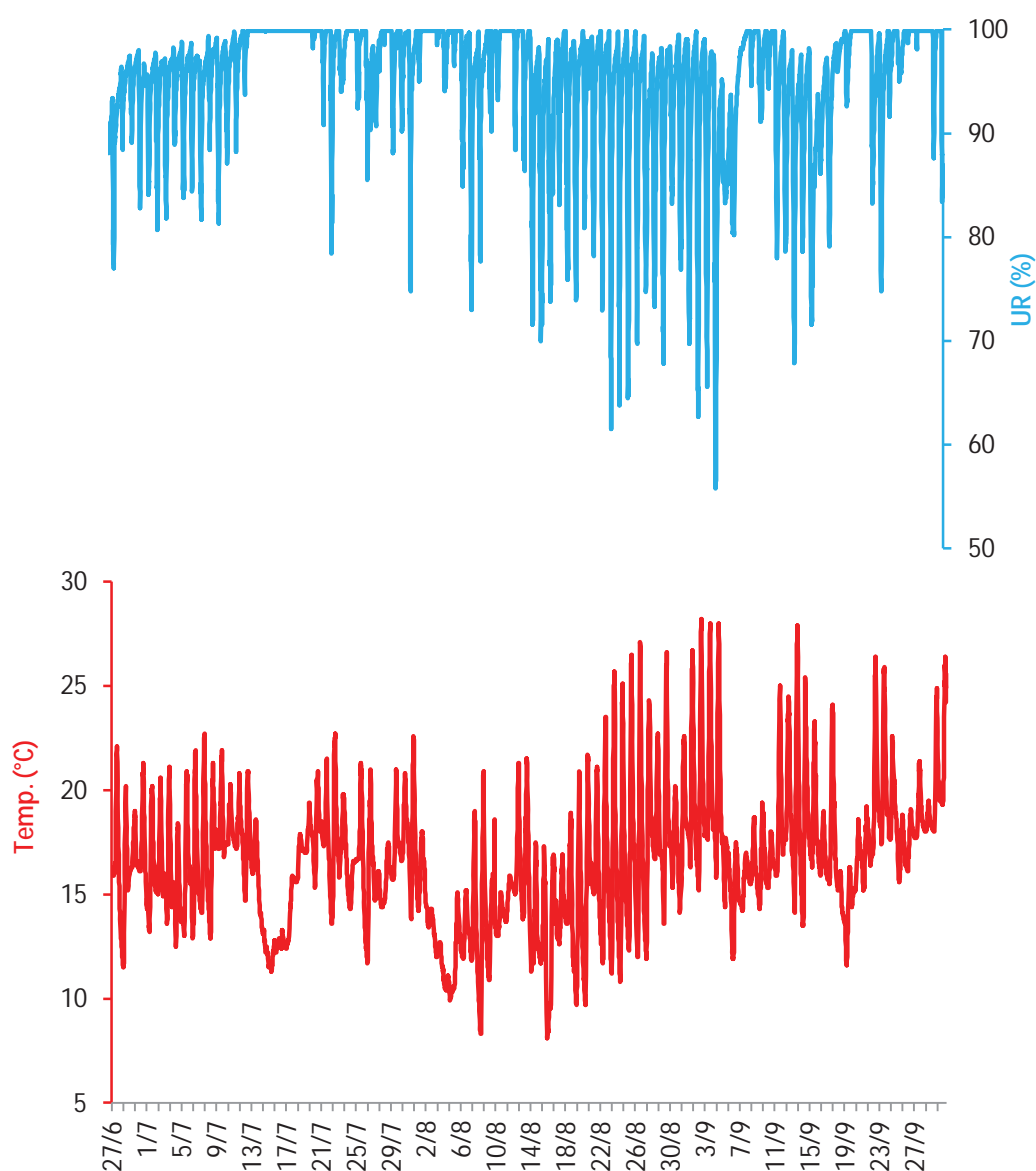


Figura 7.52 – Séries originais da temperatura (vermelho) e umidade relativa do ar (azul) na estação Externa, para o período entre 26 de junho de 2010 e 30 de setembro de 2010

A umidade relativa do ar apresentou forte correlação positiva com as chuvas, atingindo os valores máximos de saturação hídrica (99,9%) nos dias de maior chuva acumulada (ver Figura 7.51). Por outro lado, valores muito baixos de umidade também foram registrados, chegando ao extremo de 55,8% as 13h 20min do dia 04 de setembro, e permanecendo em valores abaixo dos 60% até as 15h 20min deste dia, sendo este o período mais seco registrado. A média da umidade relativa para o período foi de 95,2%, e a moda de 99,9% – sendo o mês de julho o de maior umidade, com média de 97,13%, mínima de 74,8% e desvio padrão de 3,87 –, evidenciando, de um modo geral, a alta umidade relativa do ar predominante na região. Outras características sobre a dinâmica da umidade relativa são interpretadas a partir das funções de autocorrelação e densidade espectral (Figura 7.53).

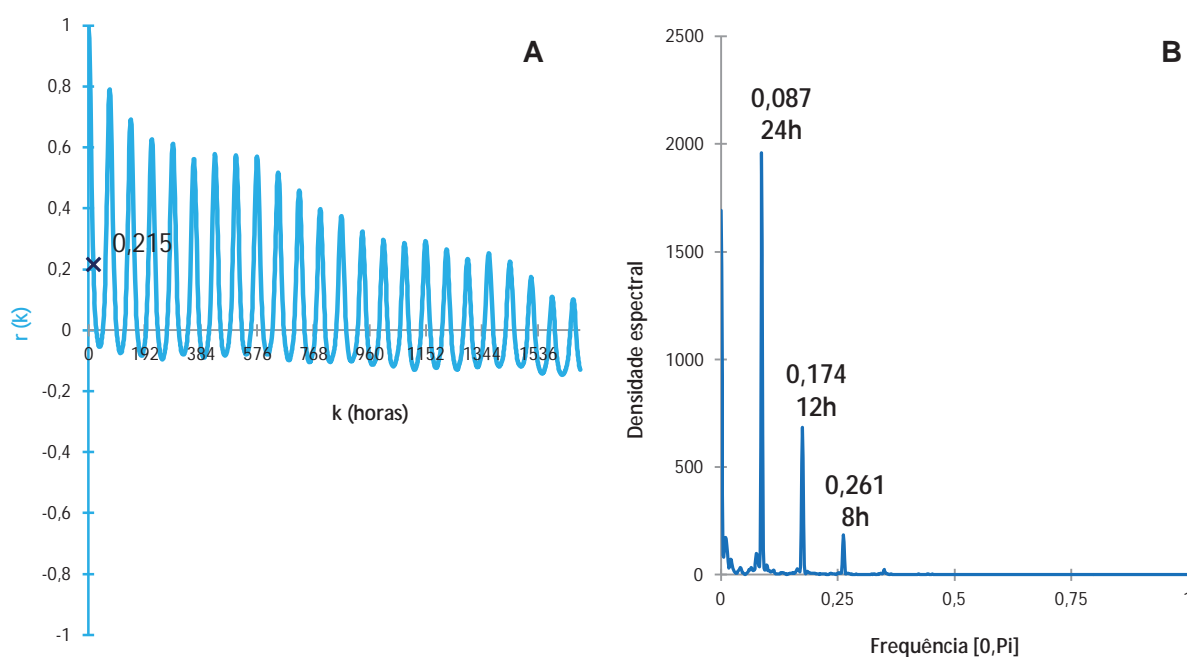


Figura 7.53 – Função de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série da umidade relativa do ar da estação Externa

O correlograma (Figura 7.53A) da umidade relativa do ar demonstrou grande ciclicidade da série, bem como rápido decaimento, o que indica a elevada dinâmica hídrica do microclima externo à caverna de Santana. O efeito de memória do sistema é atingido em 16h ($r = 0,215$). A densidade espectral (Figura 7.53B) apresenta elevados valores em frequências baixas, com picos que representam os ciclos diurnos (24h e 12h) e também um pico de 8h, desvelando outras

periodicidades cíclicas evidentes no caso da variação hídrica. Picos em frequências de corte abaixo do pico de 24h evidenciam a existência de fenômenos cíclicos mais amplos que o limite da série coletada.

Observa-se também uma correlação inversamente proporcional entre a diminuição da umidade relativa e o aumento da temperatura, sobretudo nos casos extremos para ambos (mínimas de umidade relativa e máximas de temperatura do ar). Um exemplo ilustrativo é demonstrado na Figura 7.54.

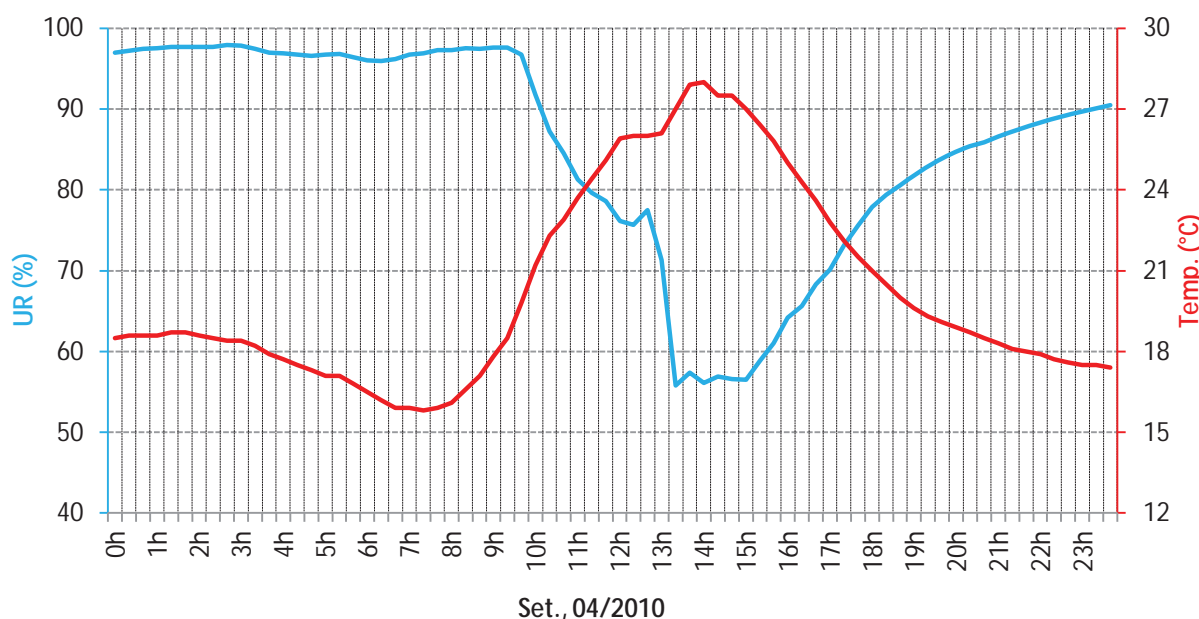


Figura 7.54 – Variação em detalhe da umidade relativa e temperatura do ar no dia 04 de setembro de 2010

Neste dia, tomado como exemplo, durante toda a madrugada a UR esteve acima dos 95%, permanecendo assim até às 9h 40min. Por sua vez, a temperatura neste período apresentou ligeira queda, indo de 18,5 °C às 0h aos 15,8 °C às 07h 20min. A partir deste horário, a temperatura voltou a subir gradativamente, até que às 10h, superou a casa dos 21 °C e começou a se elevar mais rapidamente. A temperatura atingiu, então, a sua máxima neste dia, de 28 °C, às 14h, momento em que a UR chegou a 56,1% – sendo que já estava muito baixa desde as 13h 20min, quando chegou à sua mínima de 55,8% neste dia.

Outros exemplos de temperaturas mais elevadas foram também registrados neste monitoramento (Figura 7.52). A maior temperatura para o período foi de 28,2 °C, às 14h 20min do dia 2 de setembro. Entre os dias 25 de agosto e 5 de setembro,

a temperatura atingiu diversas vezes picos acima dos 25 °C, destoando bastante da média de 16,5 °C e da moda de 16,7 °C para o inverno de 2010.

O mês de julho foi o mais frio, com máxima de 22,7 °C e mínima de 11,3 °C. Todavia, a mínima para o período foi de 8,1 °C, às 22h 20min do dia 15 de agosto. No mesmo mês, na madrugada do dia 8, a temperatura também atingiu outro vale de 8,3 °C, entre às 06h 20min e às 08h. A temperatura habitual para o inverno de 2010 foi entre 16,5 °C e 16,7 °C.

De um modo geral, apesar da grande variação térmica do ambiente externo, não foram registradas grandes anomalias nos dados, o que se verifica na suavização por meio da média móvel e de seus respectivos resíduos (Figura 7.55).

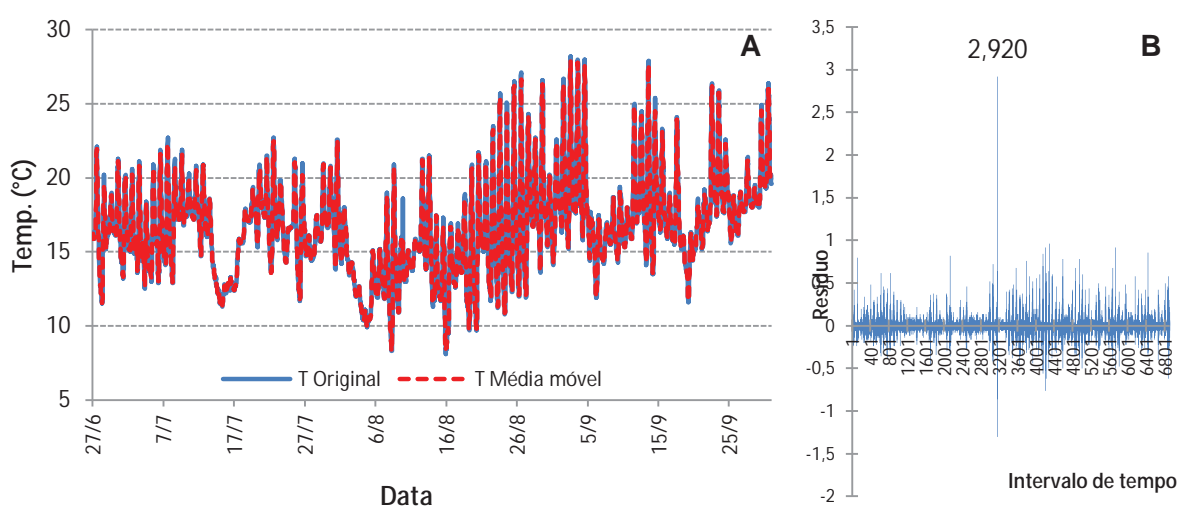


Figura 7.55 – Série original de temperatura do ar e médias móveis correspondentes (A) e respectivo gráfico de resíduos da suavização da série original x média móvel (B), na estação Externa, para o período entre 26 de junho e 30 de setembro de 2010

De um modo geral, percebe-se haver baixa discrepância entre as séries originais e a suavização nos dados da estação externa (Fig. 7.55A). Por outro lado, o valor anômalo de resíduo (2,920) demonstrado na Figura 7.55B se refere à temperatura fora dos padrões registrada às 20h 40min do dia 9 de agosto, com valor de 18,6 °C (destoando do padrão do horário neste dia, que era de aproximadamente 14,5 °C). Apesar de se tratar de uma segunda-feira, dia que o parque não recebe turistas, não se descarta totalmente a influência de presença humana neste valor, dado a sua pontualidade e considerando que não raro pesquisadores são encontrados na região em dias sem visitação turística no parque.

Finalizando as análises dos dados desta estação, são apresentadas as funções de autocorrelação e densidade espectral (Figura 7.56).

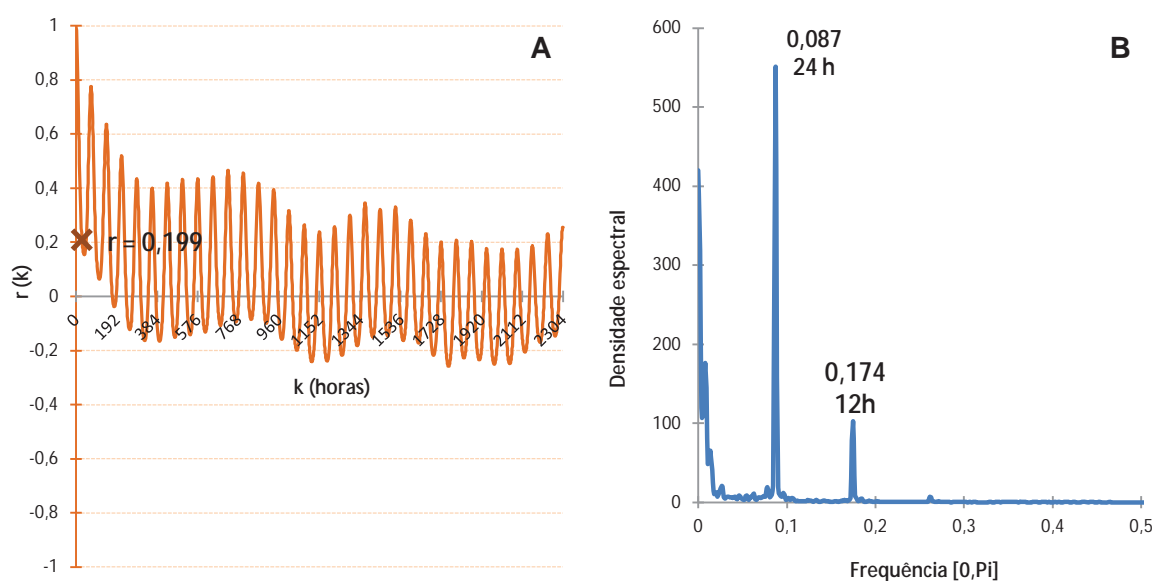


Figura 7.56 – Função de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série de temperatura do ar da estação Externa

A estação Externa é caracterizada pela periodicidade marcante do ciclo diuturno, observável nos padrões de variação dos gráficos da Figura 7.56. Considerando a série completa de 2304 horas, foi identificado um efeito de memória de 29 horas no sistema, quando r é igual a 0,199 (Figura 7.56A). Esta constatação demonstra que os dados desta série condizem mais com a realidade do ambiente externo em relação aos dados da série anual (Figura xxxx), em função de sua elevada dinâmica de variabilidade atmosférica. Esta é evidenciada na série atual, em função da rápida diminuição da função de autocorrelação à medida que o tempo avança – o que não ocorre na série anual.

Na função de densidade espectral (Figura 7.56B), os picos de 24h e 12h se fazem notar em densidades inferiores às das séries anuais, o que pode ser explicado pelo menor tempo total da amostragem do inverno em relação ao ciclo anual. De igual modo, a existência de valores de densidade espectral em frequências muito próximas ao zero demonstra a necessidade de um intervalo total maior de coleta de dados, para a identificação de outros fenômenos periódicos.

7.3.2. Monitoramento da zona transicional

7.3.2.1. Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Boca

Na estação Boca, o instrumento funcionou desde o início até as 16h do dia 30 de setembro, totalizando assim, aproximadamente 2296 horas de monitoramento (8

horas a menos que a série completa). A série de dados obtida nesta estação na terceira fase é apresentada na Figura 7.57.

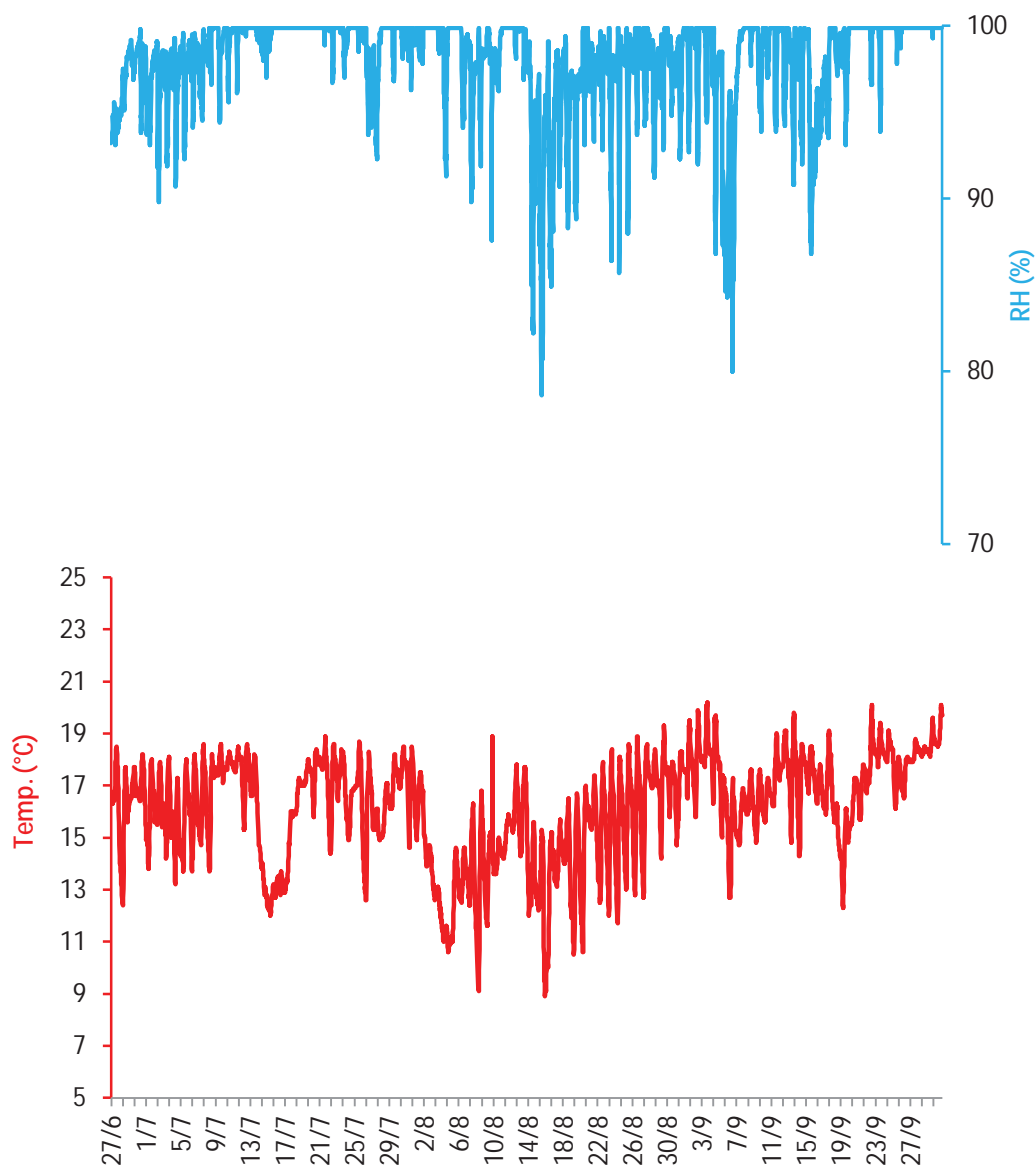


Figura 7.57 – Séries originais da temperatura (vermelho) e umidade relativa do ar (azul) na estação Boca, para o período entre 27 de junho de 2010 e 30 de setembro de 2010

A variação da UR demonstra que o microclima externo interfere diretamente na boca da caverna, sendo esta uma zona de alta troca gasosa, corroborando os resultados obtidos no monitoramento anual. Foram registradas mínimas de 78,6% em agosto e 80% em setembro. Na Figura 7.58, são apresentadas as funções de autocorrelação e densidades espectral da umidade relativa do ar na estação Boca.

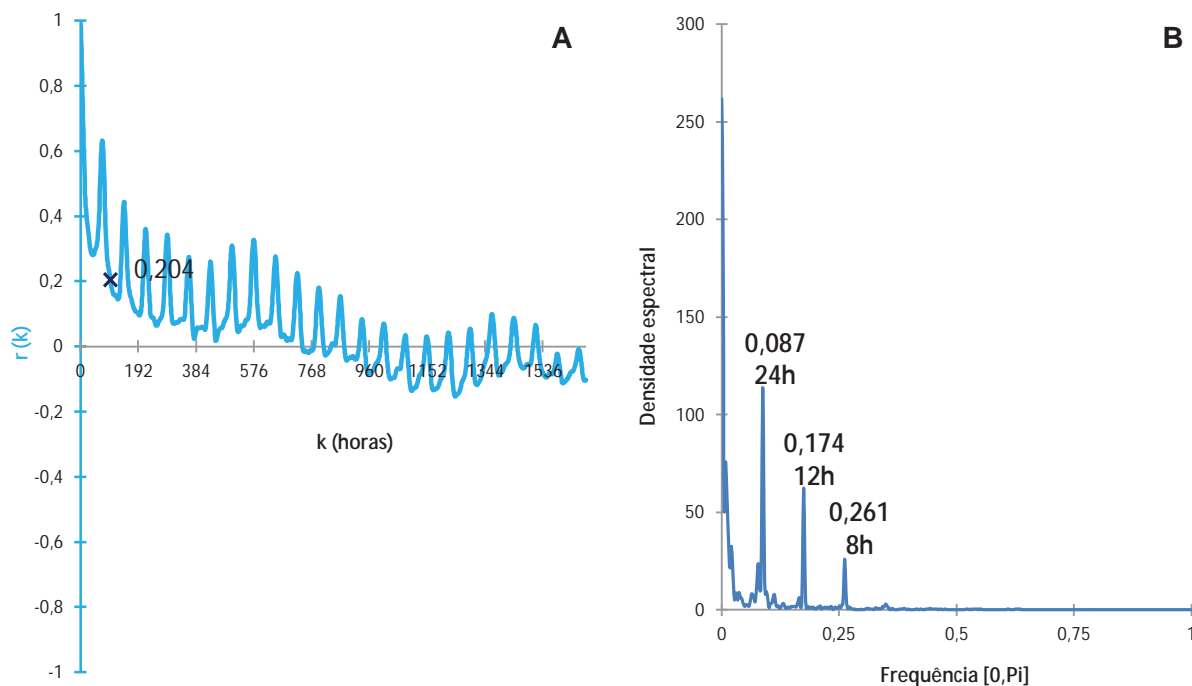


Figura 7.58 – Função de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série da umidade relativa do ar da estação Boca

O correlograma da variação higrca (Figura 7.58A) evidenciou a elevada dinâmica deste parâmetro na região da estação Boca, com marcada ciclicidade e rápido decaimento, resultando em um efeito de memória de 99h ($r = 0,204$). A densidade espectral (Figura 7.58B) demonstra de forma mais evidente a ciclicidade diuturna da umidade relativa do ar, com picos de densidade moderada em frequências de corte baixas, nos períodos de 24h, 12h e 8h. Tal como na estação Externa, demonstra também a existência de fenômenos mais amplos que afetam a umidade relativa do ar, que não foram captados em função da série temporal ser de pequeno intervalo.

Tal como na estação Externa, os valores de baixa UR na estação Boca possuem forte correlação com o aumento da temperatura do ar, o que é demonstrado na Figura 7.59.

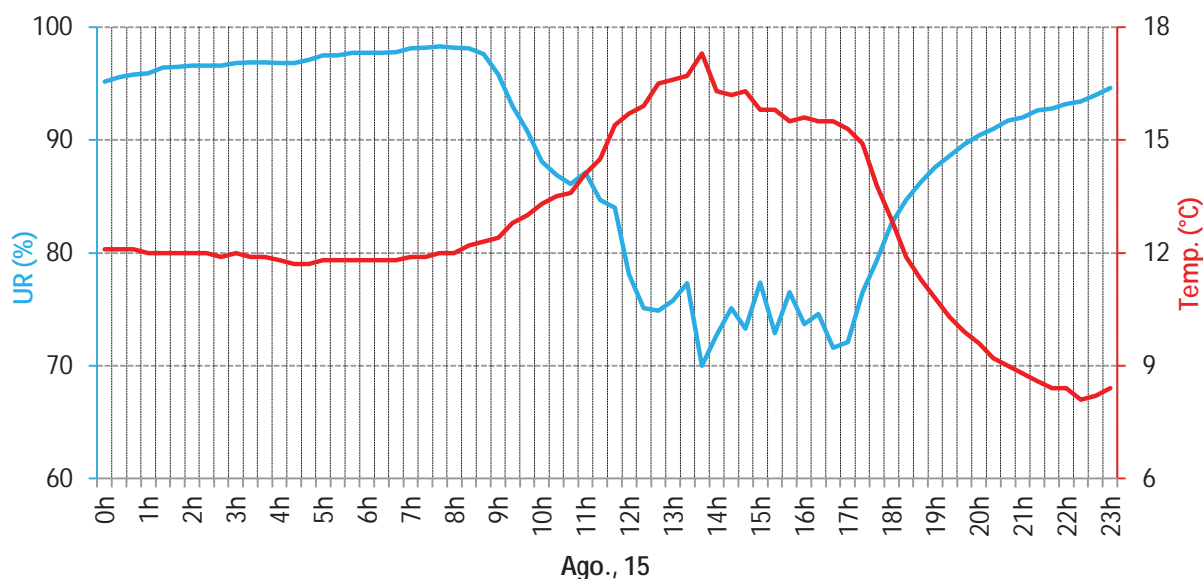


Figura 7.59 – Variação em detalhe da umidade relativa e temperatura do ar no dia 15 de agosto de 2010

Percebe-se a elevada UR durante a madrugada do dia 15 de agosto na estação Boca, com valores entre 95,2% e 98,3% - próximos da máxima de 99,9% – valor este que também corresponde à moda – e da média de 98,02%. A UR cai para valores abaixo dos 90% a partir das 10h, quando a temperatura do ar começa a subir para além dos 13 °C. O pico de temperatura do dia, de 17,3 °C às 13h 40min ocorre no exato momento em que a UR atinge seu menor valor, de 70%.

Sobre a temperatura, as mínimas do período foram registradas no mês de agosto (Figuras 7.57; 7.59), chegando a 8,9 °C, com média mensal de 14,73 °C e moda de 14,4 °C. As máximas foram registradas no mês de setembro, atingindo o pico de 20,2 °C, com média mensal de 17,26 °C e moda de 18,2 °C.

A suavização da série de dados de temperatura para a estação Boca demonstrou baixo grau de anomalia em seu padrão de variabilidade, o que se observa na Figura 7.60.

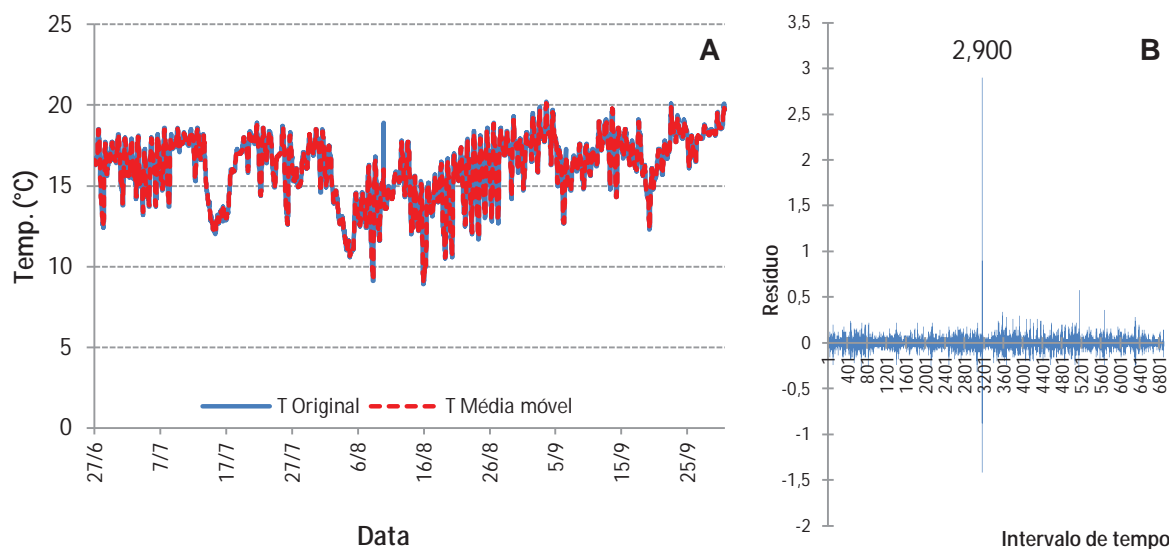


Figura 7.60 – Série original de temperatura do ar e médias móveis correspondentes (A) e respectivo gráfico de resíduos da suavização da série original x média móvel (B), na estação Boca, para o período entre 27 de junho e 30 de setembro de 2010

Quase não aparecem discrepâncias entre série original de dados e a série suavizada (Figura 7.60A). A exceção mais evidente aparece em um resíduo anômalo de resíduo de 2,9 (Figura 7.60B), repete em mesma ordem de grandeza o ocorrido na estação Externa. O fenômeno se deve a um aumento repentino da temperatura, às 20h 40min do dia 9 de agosto, que foi da ordem de 4,3 °C na estação Externa e de 4,4 °C na estação Boca. A simultaneidade da ocorrência, em tempo e amplitude térmica praticamente sincrônicos e idênticos, associada à dificuldade de acesso ao instrumento de medição da estação Boca, são indícios suficientes para descartar a hipótese anteriormente levantada de possível interferência humana no registro. Desta forma, conclui-se tratar de um fenômeno atmosférico com abrangência mínima local.

A análise desta estação se encerra com as funções de autocorrelação e de densidade espectral (Figura 7.61).

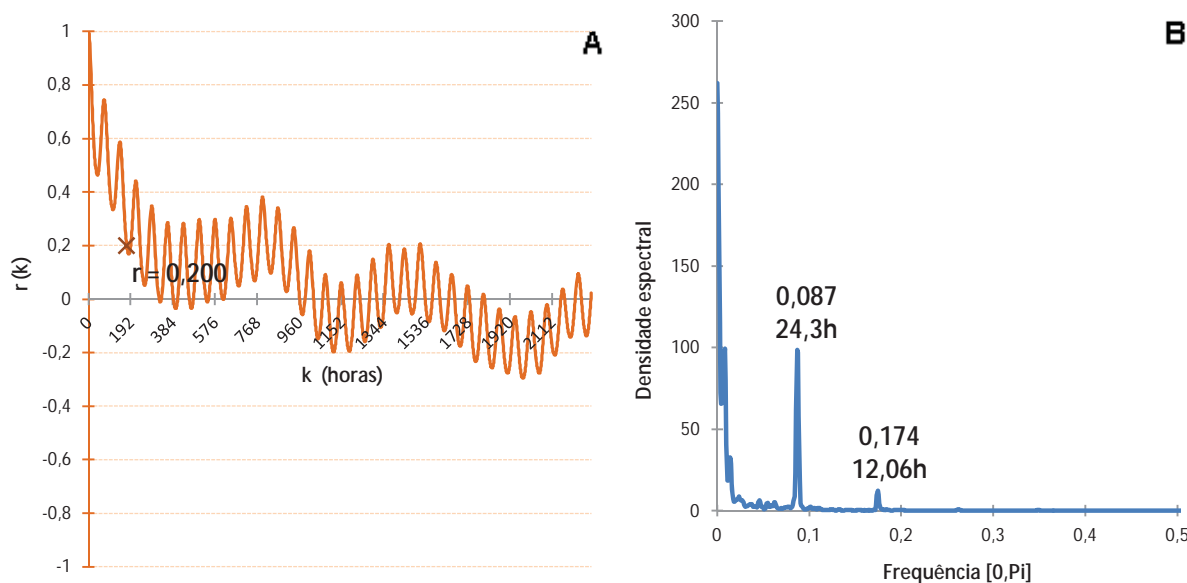


Figura 7.61 – Função de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série de temperatura do ar da estação Boca

A sazonalidade do ciclo diurno do ambiente externo é bastante evidente na estação Boca, pelo padrão de variação da função de autocorrelação (Figura 7.61A) e principalmente na densidade espectral (Figura 7.61B). A série completa desta estação é um pouco mais curta, compreendendo 2296 horas de monitoramento contínuo. O efeito de memória do sistema é de 174h ($r = 0,2$; Figura 7.61A), maior do que na estação externa, o que reflete em decaimento ligeiramente mais lento no correlograma. A análise espectral revela, como era de se esperar, a existência de fenômenos de periodicidade mais longa do que a série considerada. Todavia, o reflexo do ciclo diurno é nítido e coerente com a redução proporcional da dinâmica de fluxo energético do ambiente externo, com os valores representativos dos ciclos de aproximadamente 24h e 12h em densidades menores que na estação externa.

7.3.3. Monitoramento da zona interna típica

7.3.3.1. Variação da temperatura e umidade relativa do ar na estação Rio II

O instrumento instalado na estação Rio II teve seu funcionamento interrompido no mês de setembro, antes do término do monitoramento realizado. No dia 05 de setembro, foi feita uma coleta parcial de dados, às 11h, sendo este o limite máximo de dados aproveitados nesta estação. Após este momento, em algum dia o instrumento deixou de funcionar, mas não foi possível recuperar os dados adicionais em sua memória. Com isso, para esta estação totalizou-se 1691 horas de monitoramento, com o resultado apresentado na Figura 7.62.

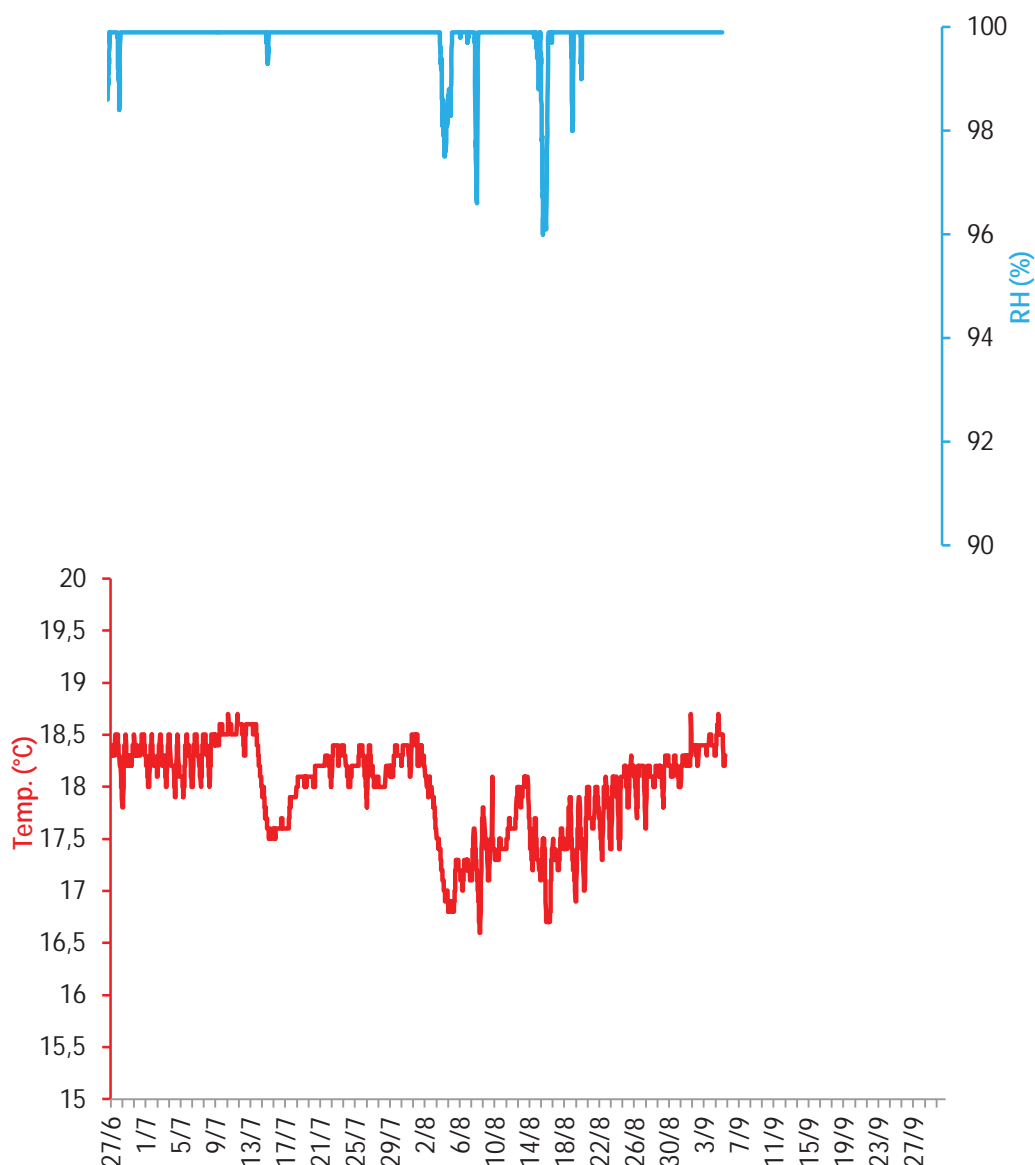


Figura 7.62 – Séries originais da temperatura (vermelho) e umidade relativa do ar (azul) na estação Rio II, para o período entre 27 de junho de 2010 e 05 de setembro de 2010

O comportamento higrotérmico desta estação ilustra que neste ponto, a caverna já adquire outra dinâmica, sobretudo do ponto de vista higrício. A umidade relativa do ar esteve sempre próxima da saturação, com a mínima atingindo os 96% em uma única ocasião, no mês de agosto (Figura 7.62). Em todo o período, a média mensal esteve sempre acima de 99,7%, enquanto a moda foi de 99,9%. No mês de setembro, a umidade estabilizou em 99,9%, sendo a saturação higrícia o provável motivo da falha no instrumento. Para esta estação, também foram feitas análises por meio das funções de autocorrelação e densidade espectral para a umidade relativa do ar (Figura 7.63).

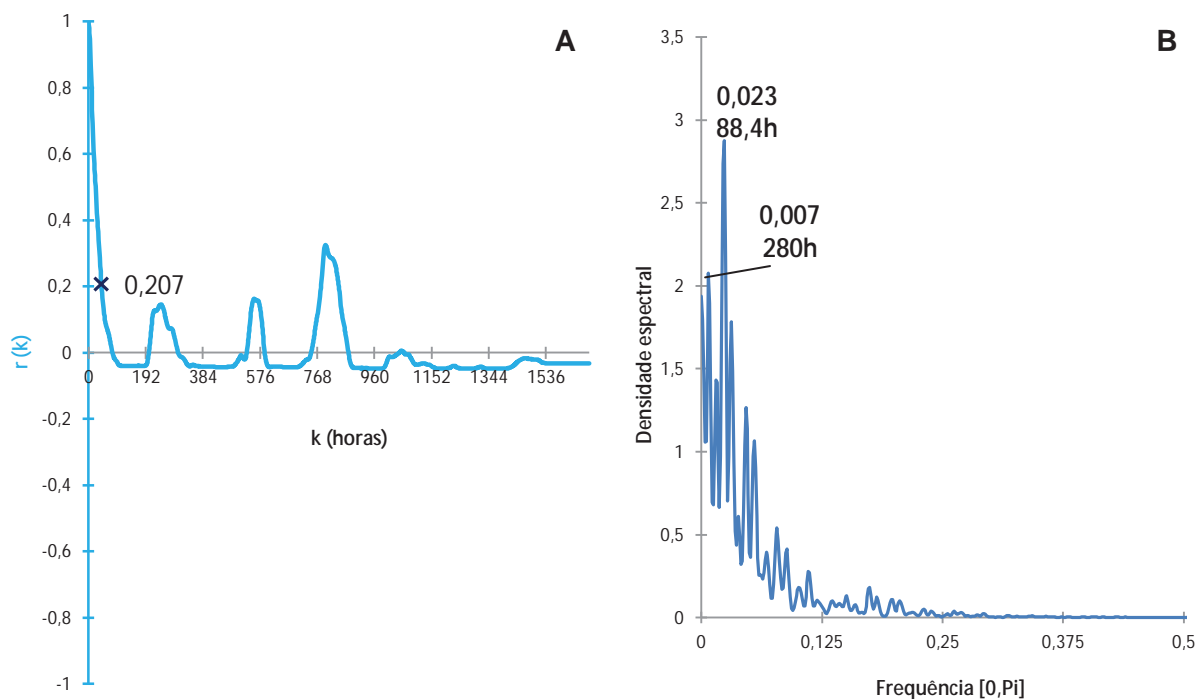


Figura 7.63 – Função de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série da umidade relativa do ar da estação Rio II

As funções analisadas na série de umidade relativa do ar na estação Rio II demonstram uma nítida mudança no padrão de variabilidade atmosférica em relação às estações anteriores. Embora o autocorrelograma (Figura 7.63A) tenha apresentado rápido decaimento, tal como nas estações anteriores, atingindo seu efeito de memória em 43h ($r = 0,207$), seu padrão de variação apresentou picos irregulares em função do tempo e grande permanência no domínio negativo da autocorrelação.

A função de densidade espectral (Figura 7.63B) evidenciou um padrão de variabilidade hídrica que não condiz com os ciclos diurnos de variação, evidenciando que a umidade relativa do ar nesta estação já recebe muito mais influência da saturação hídrica do ambiente interno (o que também se percebe pela própria estabilidade da série, na Figura 7.62), com ciclos de baixa densidade e frequência de corte, em periodicidades de 280h e 88,4h.

O padrão visual em gráfico de variabilidade da temperatura é muito semelhante ao das estações Externa e Boca, mas com amplitude mais atenuada. Observa-se que este ponto da caverna recebe influências do meio externo principalmente nas temperaturas mais baixas, fornecendo pistas para o mecanismo de circulação atmosférica da caverna de Santana.

Agosto foi o mês mais frio nesta estação, com a mínima chegando a 16,6 °C. Por outro lado, as máximas mensais giraram entre 18,5 °C e 18,7 °C, corroborando assim a interpretação anteriormente exposta. A média do período completo foi de 17,98 °C e a moda de 18,2 °C. De um modo geral, a estação apresentou grande estabilidade atmosférica e quase ausência de anomalias, com as exceções dignas de nota ressaltadas na interpretação da Figura 7.64.

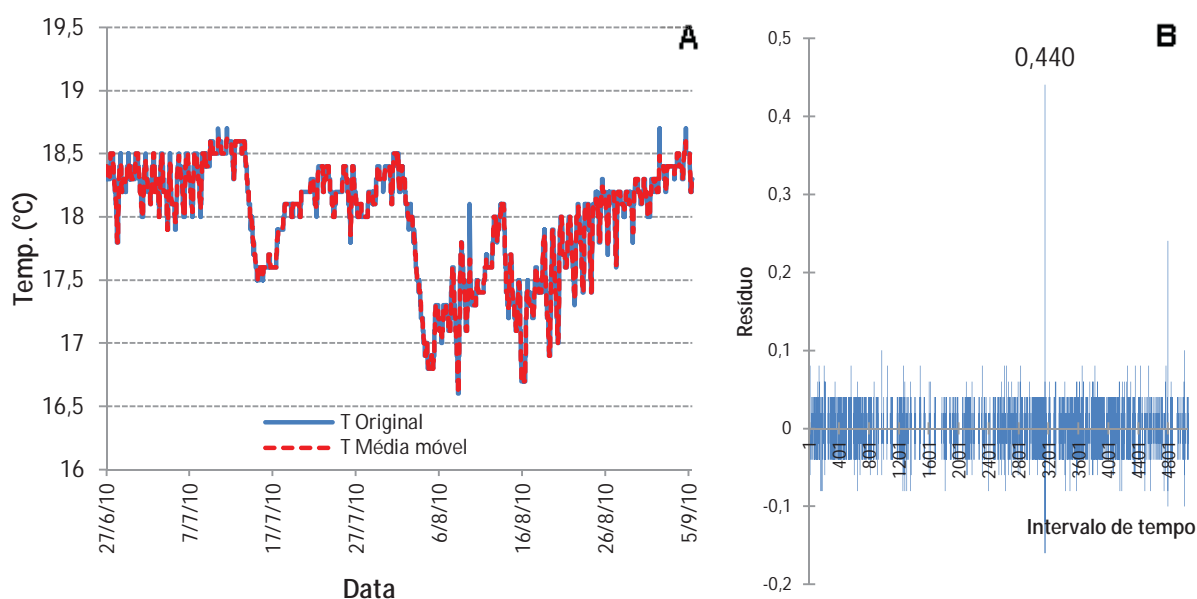


Figura 7.64 – Série original de temperatura do ar e médias móveis correspondentes (A) e respectivo gráfico de resíduos da suavização da série original x média móvel (B), na estação Rio II, para o período entre 27 de junho e 05 de setembro de 2010

A suavização da série (Figura 7.64A) ajuda a ressaltar um aspecto que poderia passar despercebido na série original (Figura 7.62). Mesmo em intensidade bastante atenuada, o fenômeno atmosférico registrado no dia 9 de agosto também aparece nesta estação, sobretudo no gráfico de resíduos (Figura 7.64B). Porém, nesta estação o fenômeno ocorreu as 17h, quase 4h antes da ocorrência nas estações anteriores, o que demonstra que a origem do fenômeno de acúmulo térmico e dispersão foi de dentro para fora da caverna, ilustrando assim a dinâmica de troca gasosa com o exterior, que neste dia e horário, estava com a temperatura mais baixa do que a caverna (17,5 °C na estação Rio II, com pico de 18,1 °C; 15,1 °C na estação Boca e 14,4 °C na estação Externa).

A análise desta série se encerra com as funções de autocorrelação e densidade espectral (Figura 7.65).

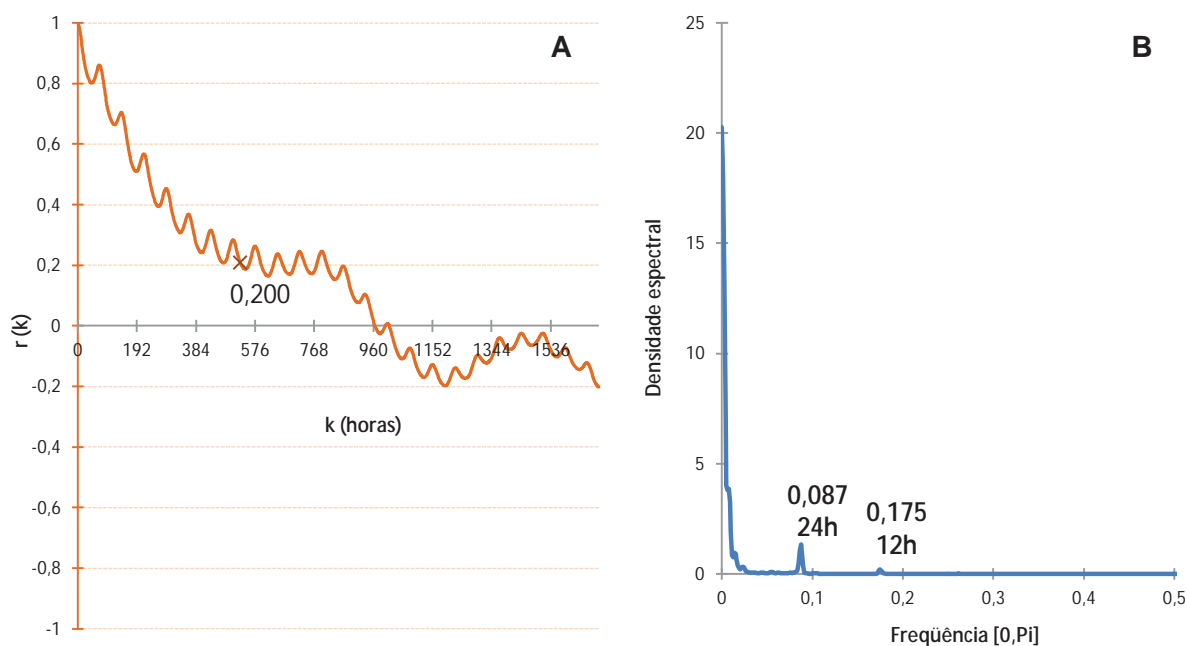


Figura 7.65 – Função de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série de temperatura do ar da estação Rio II

O padrão de variação da função de autocorrelação (Figura 7.65A) e os espectros de densidade (Figura 7.65B) evidenciam a existência de influência do ciclo diurno na temperatura ainda neste ponto da caverna, confirmando o que foi ilustrado na Figura 7.62. O efeito de memória deste ponto do sistema é mais dilatado, sendo de 531h ($r = 0,2$), com o correlograma se posicionando quase na diagonal, face a seu longo decaimento. As densidades espectrais para os ciclos de 24h e 12h são bem menores, abaixo de 2, reduzindo exponencialmente a escala do eixo y em relação às estações anteriores. De igual modo às estações anteriores, a existências de fenômenos cíclicos mais amplos é denunciada também pela densidade espectral.

7.3.3.2. Variação da temperatura do ar, da água e da umidade relativa do ar na estação Rio III

A estação Rio III foi monitorada em três parâmetros físicos, sendo eles a temperatura do ar, do água e a umidade relativa do ar. A princípio os dados são apresentados de forma separada, considerando os meios ar e água. Ao fim, algumas correlações entre a temperatura do ar e da água são também comentadas.

7.3.3.2.1. Temperatura e umidade relativa do ar

A estação Rio III funcionou durante todo o período monitorado, totalizando 2304 horas de monitoramento contínuo. Os resultados gerais do monitoramento higrotérmico são apresentados na Figura 7.66.

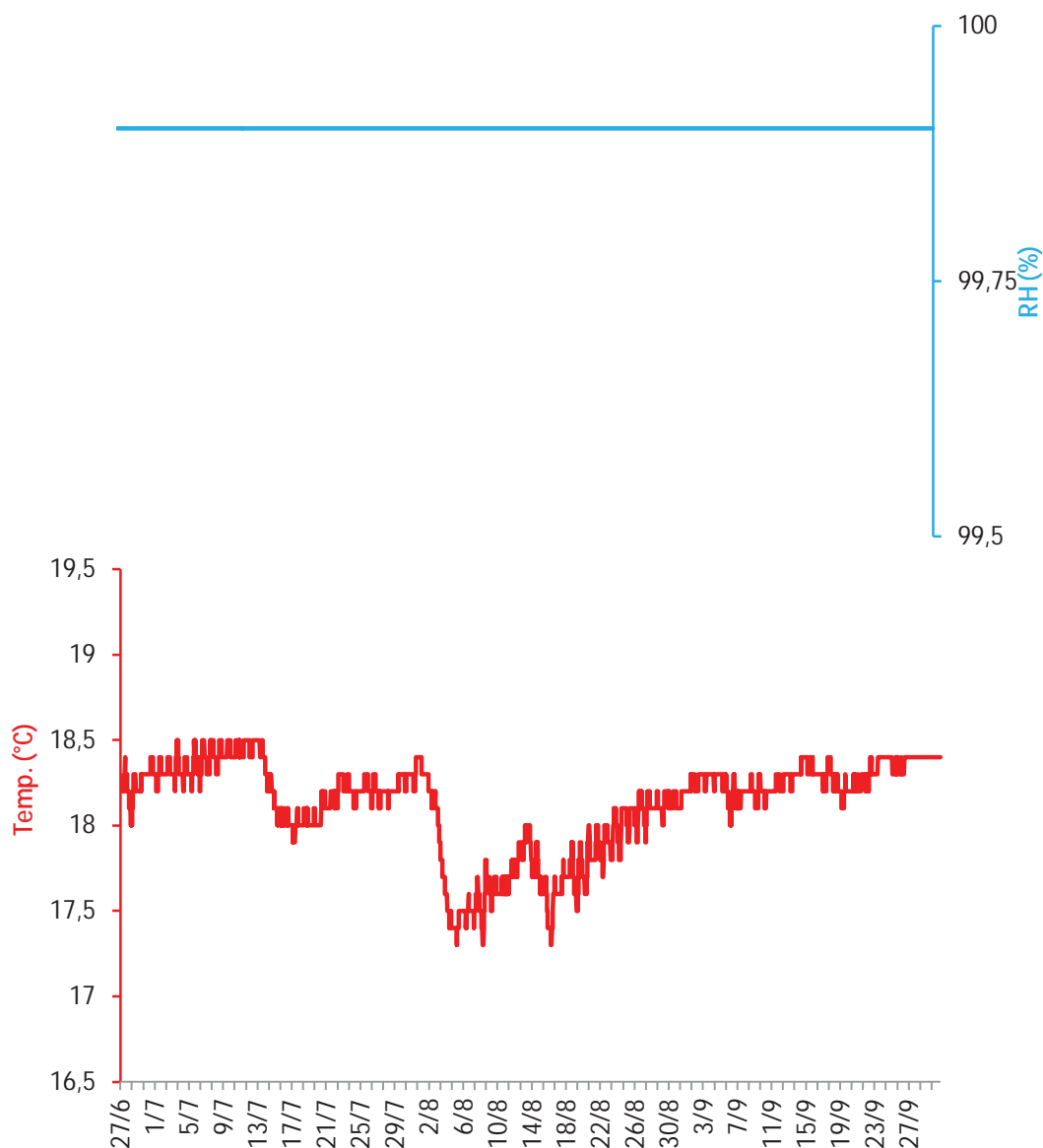


Figura 7.66 – Séries originais da temperatura (vermelho) e umidade relativa do ar (azul) na estação Rio III, para o período entre 27 de junho de 2010 e 30 de setembro de 2010

A estação Rio III já se encontra totalmente dentro do limite de saturação hídrica da caverna de Santana, apresentando umidade relativa do ar constante em 99,9% em todo o período monitorado. A baixa variação da temperatura do ar é outra característica deste ponto, com amplitude de 1,2 °C no período completo.

O mês de agosto foi o mais frio, atingindo a mínima de 17,3 °C, além da média de 17,82 °C e moda de 18,1 °C, valores aproximadamente 0,4 °C abaixo dos demais meses monitorados. A temperatura mais elevada foi registrada em julho, atingindo 18,5 °C.

A série não apresentou anomalias em sua variação, com resíduos em valores muito baixos, não excedendo o valor de 0,1. A suavização pela média móvel evidencia a falta de fenômenos abruptos neste trecho do sistema (Figura 7.67).

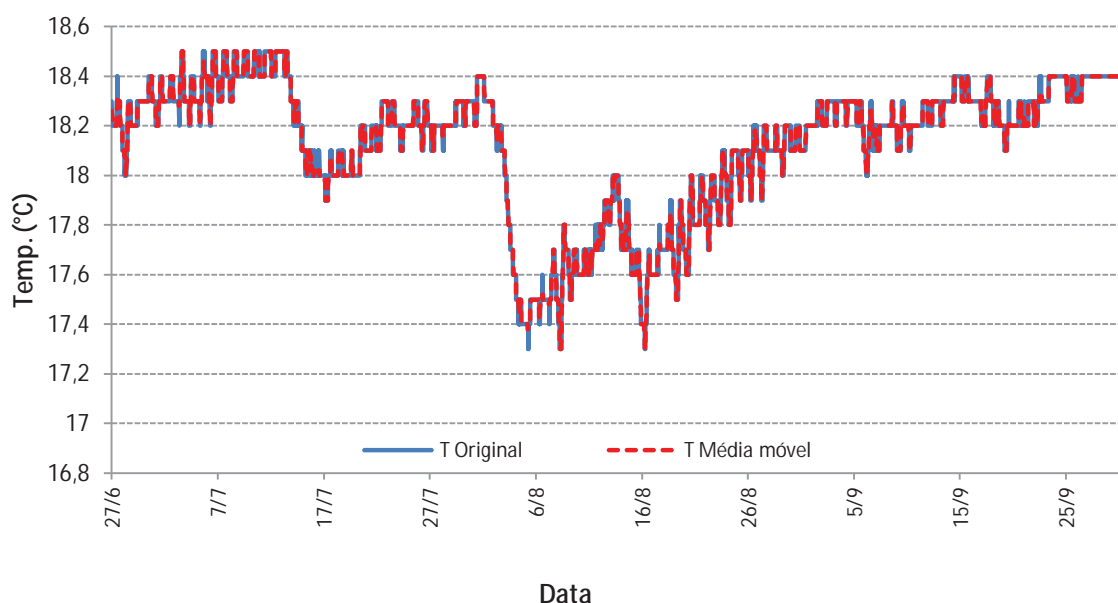


Figura 7.67 – Série original de temperatura do ar e médias móveis correspondentes na estação Rio III, para o período entre 27 de junho e 30 de setembro de 2010

A ausência de anomalias na suavização denota uma variabilidade mais coesa e gradativa neste ponto do sistema, demonstrando a redução relativa da influência da dinâmica gasosa. Embora a variação térmica seja visualmente muito semelhante àquela obtida nas estações anteriores, atribui-se este padrão muito mais ao processo de adevção térmica do que à dinâmica de troca gasosa. Assim, percebe-se outro padrão atmosférico para este ponto da caverna de Santana, que provavelmente recebe influência maior da temperatura da água, como será visto adiante.

A análise isolada da série de dados de temperatura do ar desta estação se encerra com as funções de autocorrelação e densidade espectral (Figura 7.68).

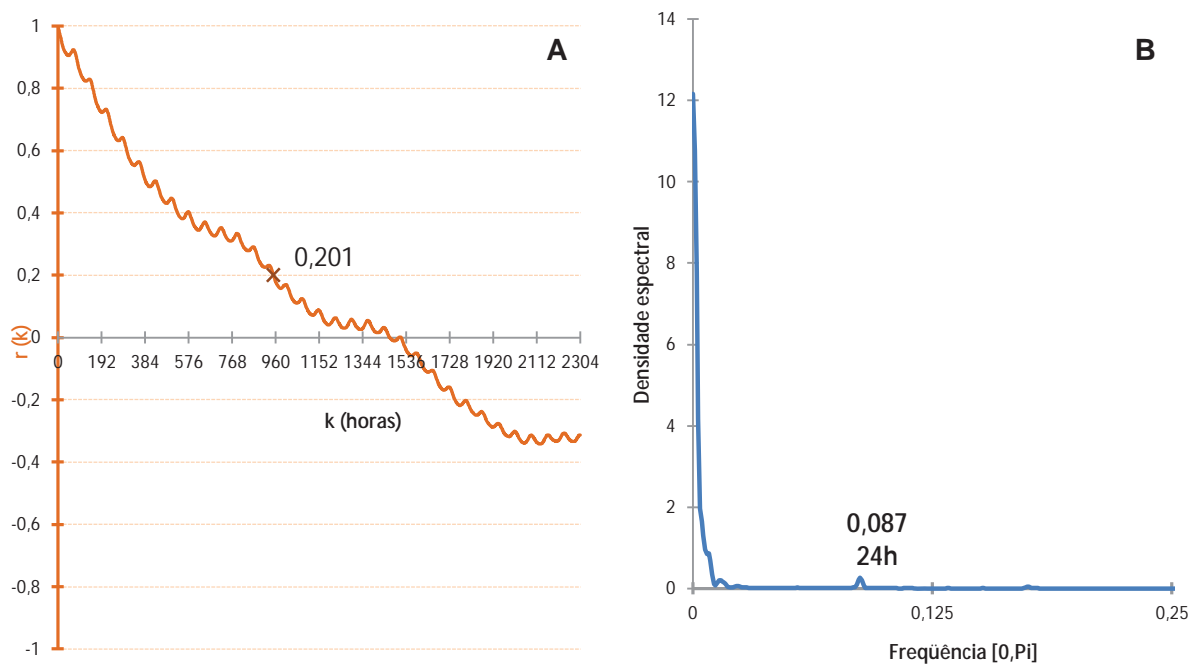


Figura 7.68 – Função de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série de temperatura do ar da estação Rio III

O efeito de memória deste ponto do sistema é atingido com 950h, quando $r = 0,201$. Como era de se esperar, o decaimento do correlograma é ainda mais lento (Figura 7.68A), denotando maior estabilidade na série de dados atmosféricos de temperatura. O ciclo diuturno praticamente desaparece, aparecendo apenas em densidade e frequência de corte muito baixas (Figura 7.68B).

7.3.3.2.2. *Temperatura da água*

A série de dados em escala de detalhe para a temperatura da água possui a mesma duração das séries coletadas para o ar, com 2304 horas de monitoramento. A série original e a suavização por médias móveis são apresentadas na Figura 7.69.

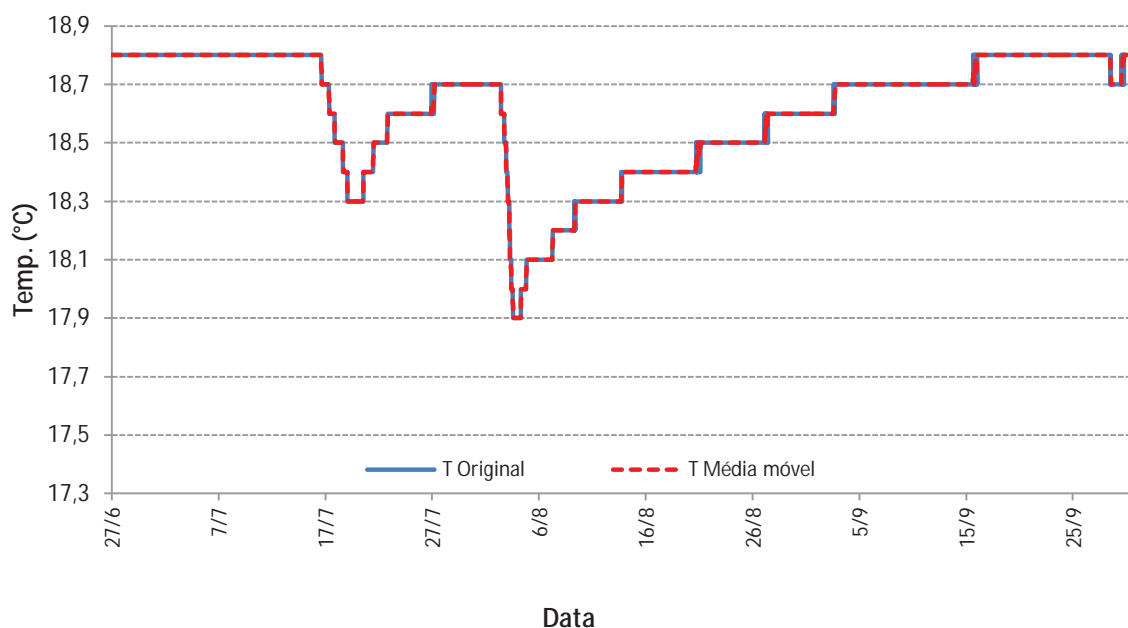


Figura 7.69 – Série original de temperatura da água e médias móveis correspondentes na estação Rio III, para o período entre 27 de junho e 30 de setembro de 2010

A temperatura da água apresentou como uma de suas características os grandes períodos de estabilidade, por vezes superiores a 10 dias sem nenhuma variação na temperatura (Figura 7.69). Isso foi registrado nos meses de junho/julho e setembro. Em julho, a amplitude térmica foi de 0,5 °C, com mínima de 18,3 °C e máxima de 18,8 °C – sendo este valor também a moda mensal e muito próximo da média, de 18,69 °C. As temperaturas mais frias foram registradas em agosto, quando a água chegou a 17,9 °C, e a média e a moda caíram para a casa de 18,4 °C. Em setembro, um cenário de maior estabilidade térmica pode ser notado, com mínima de 18,6 °C, máxima de 18,8 °C e média e moda na casa dos 18,7 °C. De um modo geral, a temperatura da água do rio Roncador sempre esteve mais quente que a temperatura do ar neste mesmo ponto da galeria.

A suavização da série demonstrou baixo grau de anomalias nesta parte do sistema (Figura 7.69), com resíduos sempre inferiores a 0,1. Isto se deve, provavelmente, a maior capacidade específica da água em reter o calor, o que a deixa menos sujeita às variações térmicas de pequeno termo, no âmbito diário. Outros fatores, como o fato de se tratar de um aquífero parcialmente confinado e com grande tempo de permanência em meio subterrâneo, certamente também diminuem as influências diuturnas do clima externo em sua temperatura.

Finalizando, são apresentadas as funções de autocorrelação e densidade espectral da temperatura da água na estação Rio III, na Figura 7.70.

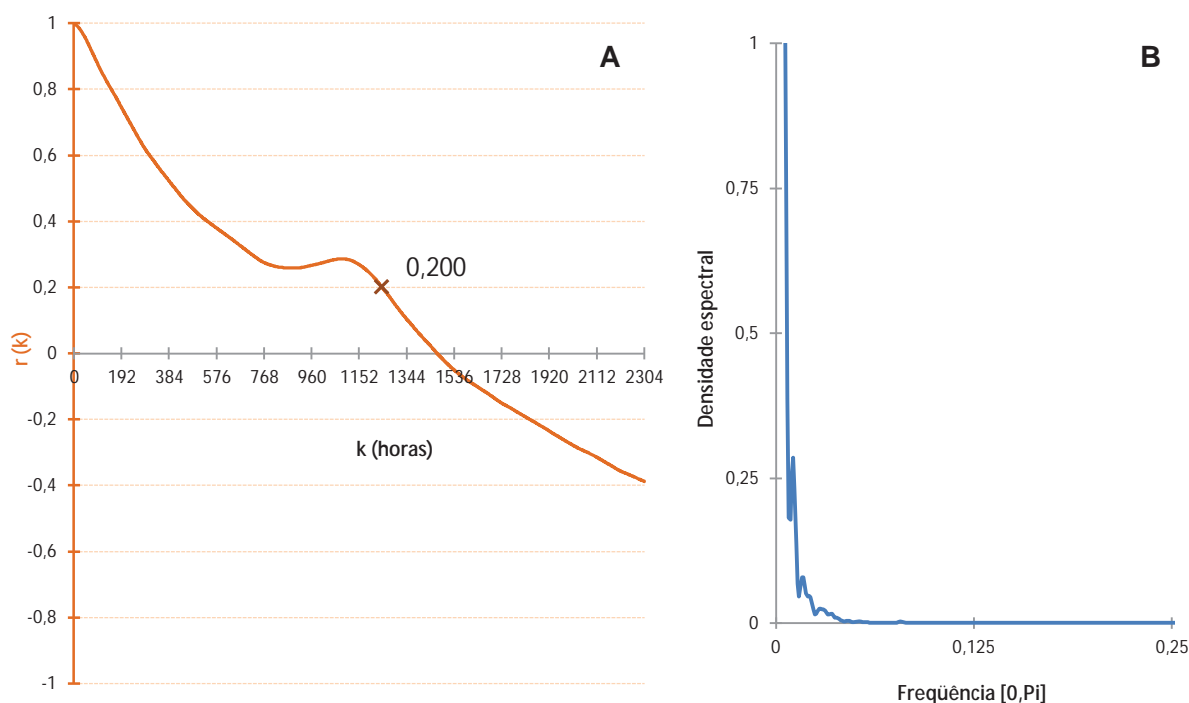


Figura 7.70 – Função de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série de temperatura da água da estação Rio III

A função de autocorrelação evidencia uma baixa dinâmica relativa no ambiente, se comparado com os pontos atmosféricos da mesma região na caverna de Santana. O efeito de memória da temperatura da água do rio Roncador é de 1245h, o que equivale a 51,8 dias ($r = 0,2$; Figura 7.70A). A ciclicidade de 24h da variação diuturna não se faz evidenciar na água, ao menos dentro dos limites temporais da série estudada, o que se verifica pela ausência de um pico de densidade espectral na Figura 7.70B – embora, empiricamente, o valor tenha aparecido em baixa densidade e frequência de corte, próxima a 0,087.

7.3.4. Monitoramento da zona de baixa amplitude térmica

7.3.4.1. Variação da temperatura e da umidade relativa do ar na estação Rio Verde

O termohigrômetro da estação Rio Verde apresentou problemas em seus primeiros dias de funcionamento, por falta de fornecimento de energia na bateria ou até mesmo por excesso de umidade no local. Com isso, a série de dados desta estação ficou incompleta, sendo contada somente a partir da resolução do problema com o instrumento, que ocorreu no dia 11 de agosto.

A série original de dados de temperatura e umidade relativa do ar, totalizando 1224 horas de monitoramento da estação Rio Verde, é apresentada na Figura 7.71.

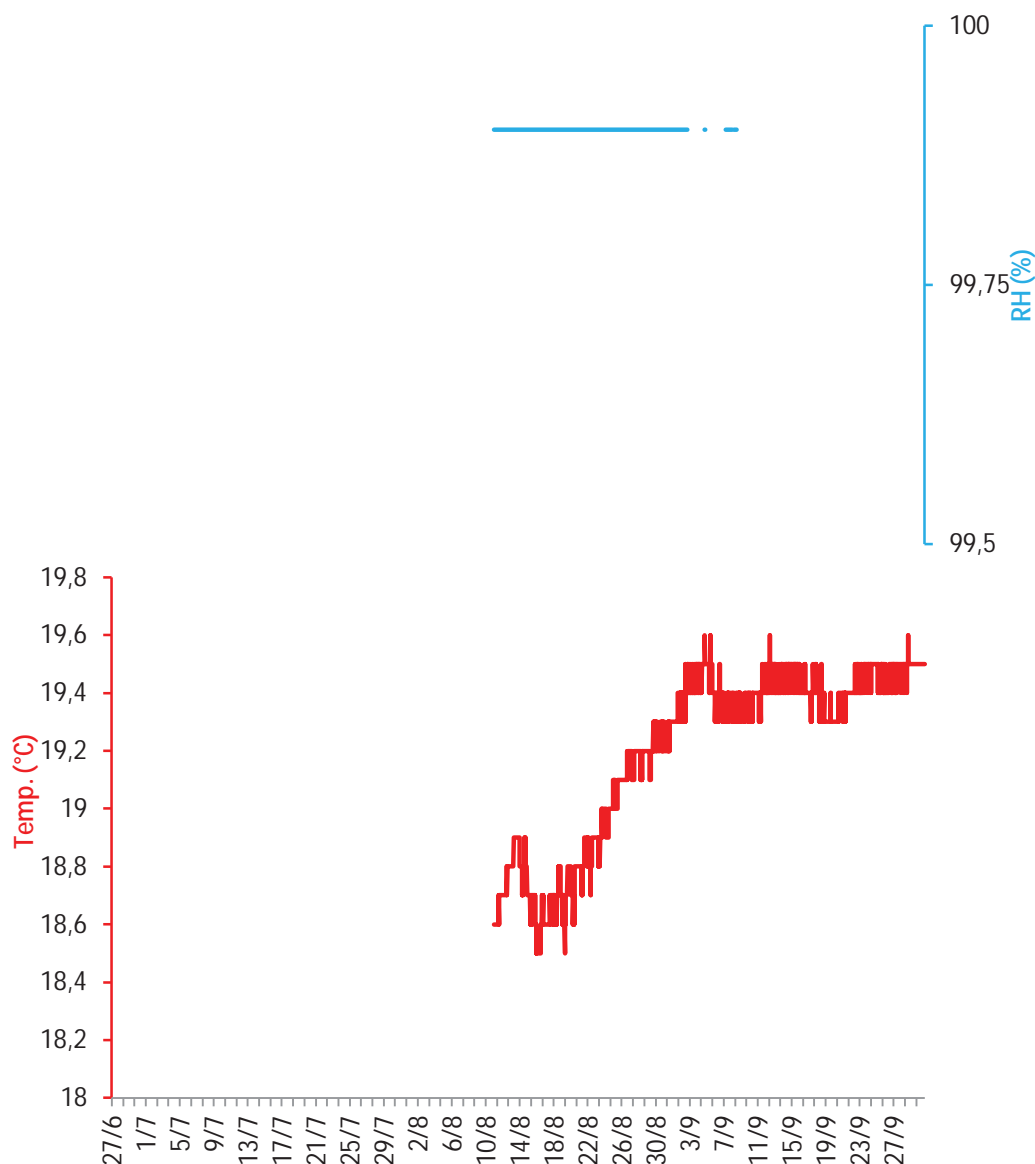


Figura 7.71 – Séries originais da temperatura (vermelho) e umidade relativa do ar (azul) na estação Rio Verde, para o período entre 11 de agosto de 2010 e 30 de setembro de 2010

A série de dados de umidade relativa do ar apresentou diversas falhas (Figura 7.71), muito provavelmente provocadas por condensação de água no sensor do instrumento de coleta. No tempo em que esteve funcionando, a umidade foi constante em 99,9%, demonstrando a saturação hídrica da galeria superior, na região do rio Verde.

A temperatura do ar na zona de baixa amplitude térmica é sensivelmente mais elevada que as zonas da galeria do rio da caverna de Santana, o que ocorre,

muito provavelmente, pelos efeitos da convecção de ar. A máxima do período na estação Rio Verde foi de 19,6 °C, registrada no mês de setembro, e a mínima foi de 18,5 °C, registrada em agosto. A média geral da série foi de 19,2 °C e a moda de 19,4 °C. A suavização da série de temperatura do ar da estação Rio Verde é apresentada na Figura 7.72.

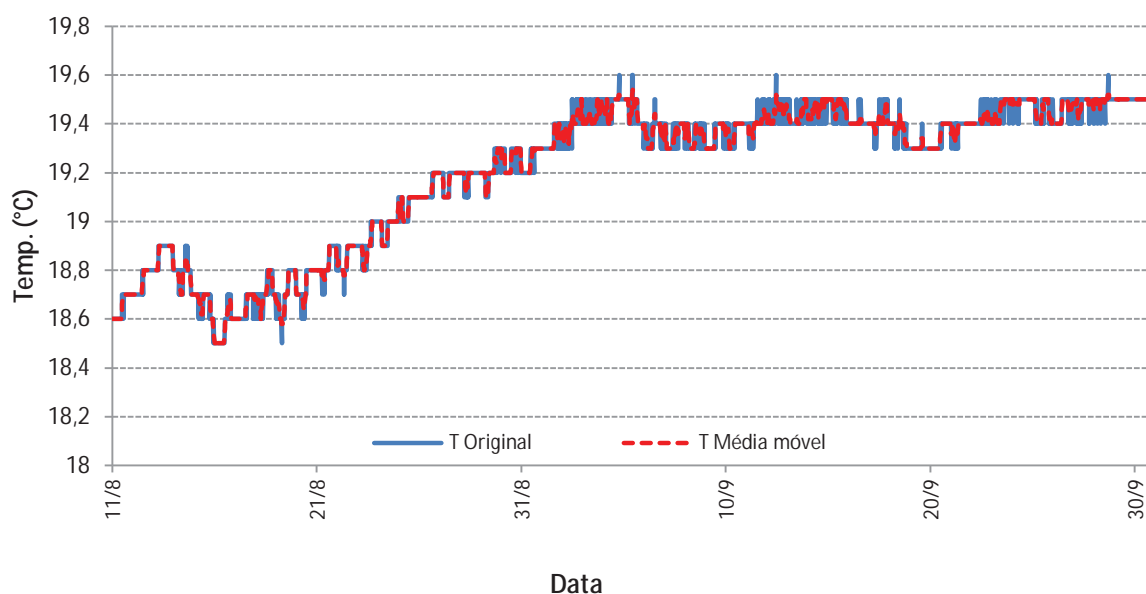


Figura 7.72 – Série original de temperatura da água e médias móveis correspondentes na estação Rio III, para o período entre 11 de agosto e 30 de setembro de 2010

A suavização por meio das médias móveis demonstra a inexistência de grandes anomalias na série de dados da estação Rio Verde. Isto evidencia grande estabilidade atmosférica, deixando clara a baixa influência relativa das variações diurnas neste trecho da caverna, em comparação com as áreas já apresentadas. De um modo geral, o padrão de variação da temperatura do ar é muito semelhante em gráfico ao já observado na estação Rio III (Figura 7.67). Outras características deste trecho do sistema podem ser subtraídas da interpretação das funções de autocorrelação e densidade espectral (Figura 7.73) da série de temperatura do ar.

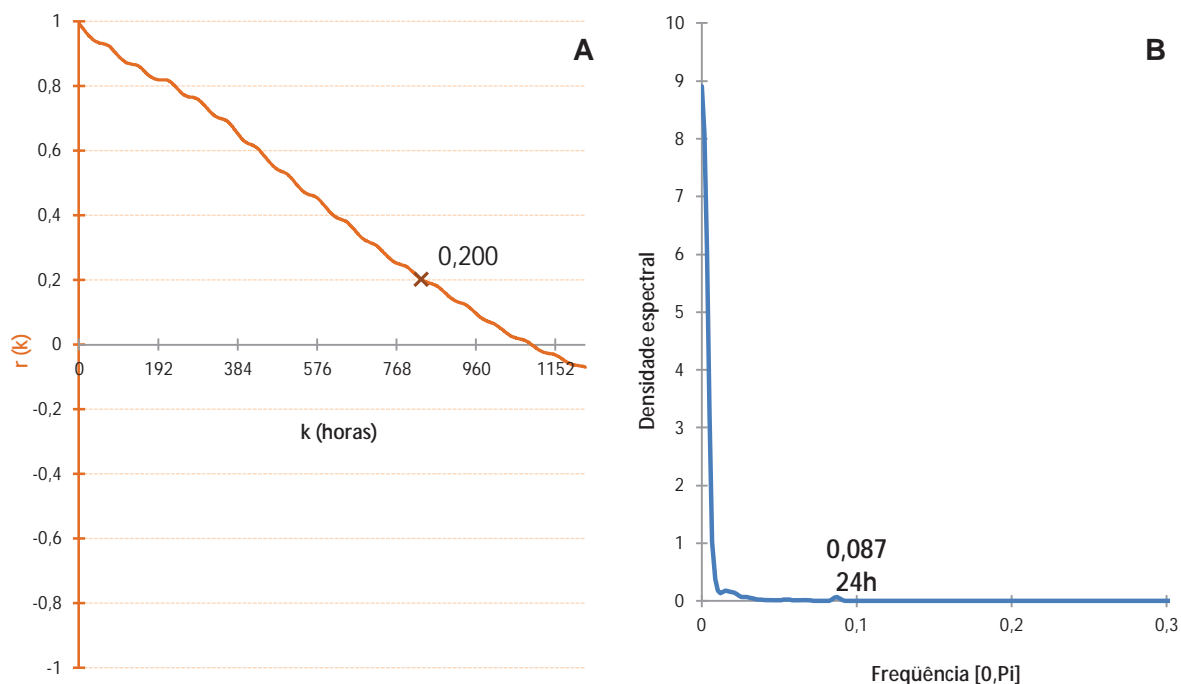


Figura 7.73 – Função de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série de temperatura da água da estação Rio Verde

O correlograma (Figura 7.73A) da estação Rio Verde apresentou decaimento bastante lento, não se descartando neste caso a possível influência da série restrita de dados – embora este padrão fosse esperado para este local. O efeito de memória do sistema foi atingido com 828h ($r = 0,2$), apresentando uma dinâmica de troca gasosa e conseqüente influência do meio externo mais elevada que a estação anterior, a Rio III. Esta condição é bastante coerente com a condição espacial desta estação, que não somente está mais perto do meio externo, mas está em galeria superior, de forma a permitir que a convecção de ar leve influências do meio externo até ela. Isto se evidencia, ainda que em baixo grau, na densidade espectral (Figura 7.73B), que permitiu a identificação, ainda que em densidade e frequência de corte muito baixas, de um pico de 24h.

7.3.4.2. Variação da temperatura e da umidade relativa do ar na estação Cristo

O registro de dados na estação Cristo também foi encerrado antes do tempo previsto, em função de problemas com o instrumento de medição. Seu funcionamento foi interrompido às 23:40h do dia 13 de setembro, totalizando, assim, 1896h de registros. O resultado geral é apresentado na Figura 7.74.

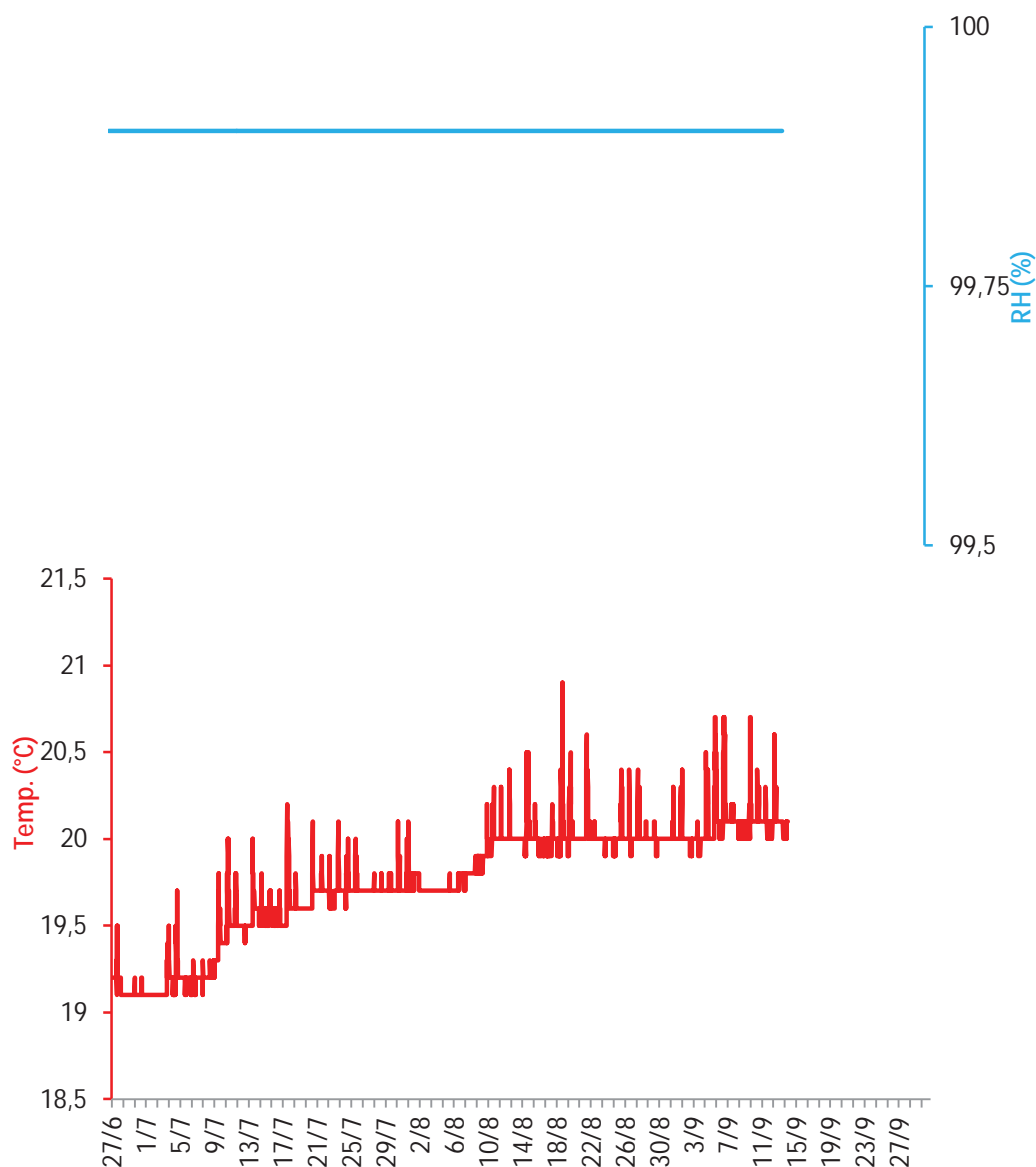


Figura 7.74 – Séries originais da temperatura (vermelho) e umidade relativa do ar (azul) na estação Cristo, para o período entre 27 de junho de 2010 e 13 de setembro de 2010

A estação Cristo apresentou padrão de saturação hídrica em todo o período monitorado, sempre no valor de 99,9% para a umidade relativa do ar. Apresentou também um padrão de variação térmica totalmente anômalo em relação às demais estações, tanto dentro quanto fora da caverna, conforme já ocorrido na fase anual de monitoramento neste mesmo local e no salão do Encontro. Neste padrão, picos diários de aumento de temperatura são facilmente observados, com amplitudes de até 1 °C.

Estas anomalias diferem de outras variações atmosféricas já identificadas, pois se refletem apenas em picos, não aparecendo na forma de vales. O padrão geral de tendência de aumento da temperatura nesta estação evidencia também o

seu potencial de acúmulo térmico, o que reflete principalmente nas medidas mensais de tendência central, bem como nas medidas de dispersão (Figura 7.75).

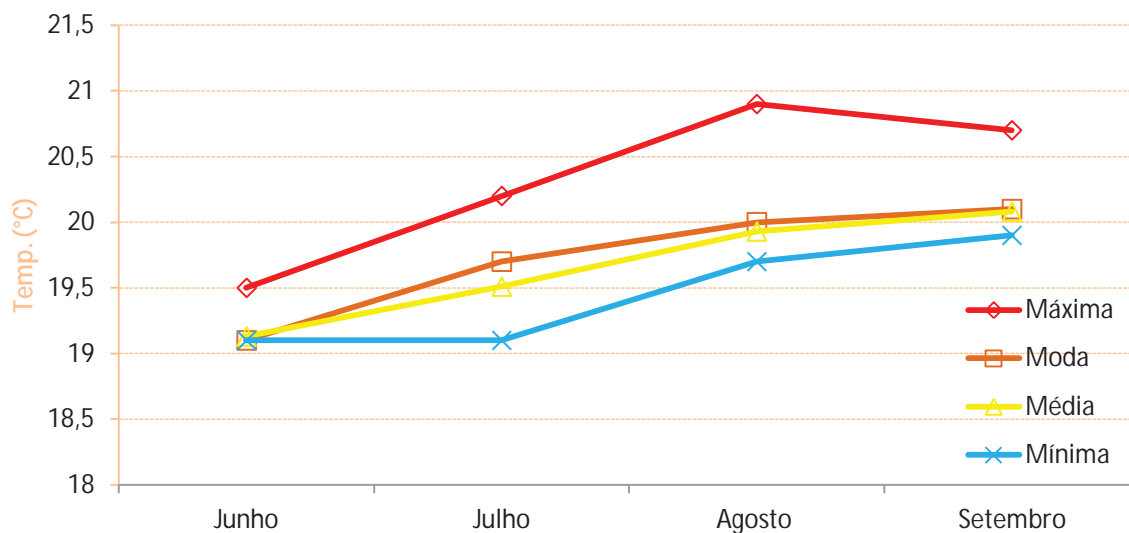


Figura 7.75 – Medidas mensais de tendência central e de dispersão para a estação Cristo (junho-setembro/2010)

O aumento geral na temperatura desta estação pode tanto estar ligado à sua posição na caverna de Santana e morfologia peculiar, por se tratar de um salão confinado e sem potencial de dispersão para dutos superiores, bem como ser causada pelo mesmo motivo que gera os picos de anomalias térmicas registrados, o que será tratado mais a frente (subseção 7.8.2, impactos no microclima). Em todo caso, a suavização da série e seus respectivos resíduos permitem a visualização da magnitude destas variações (Figura 7.76).

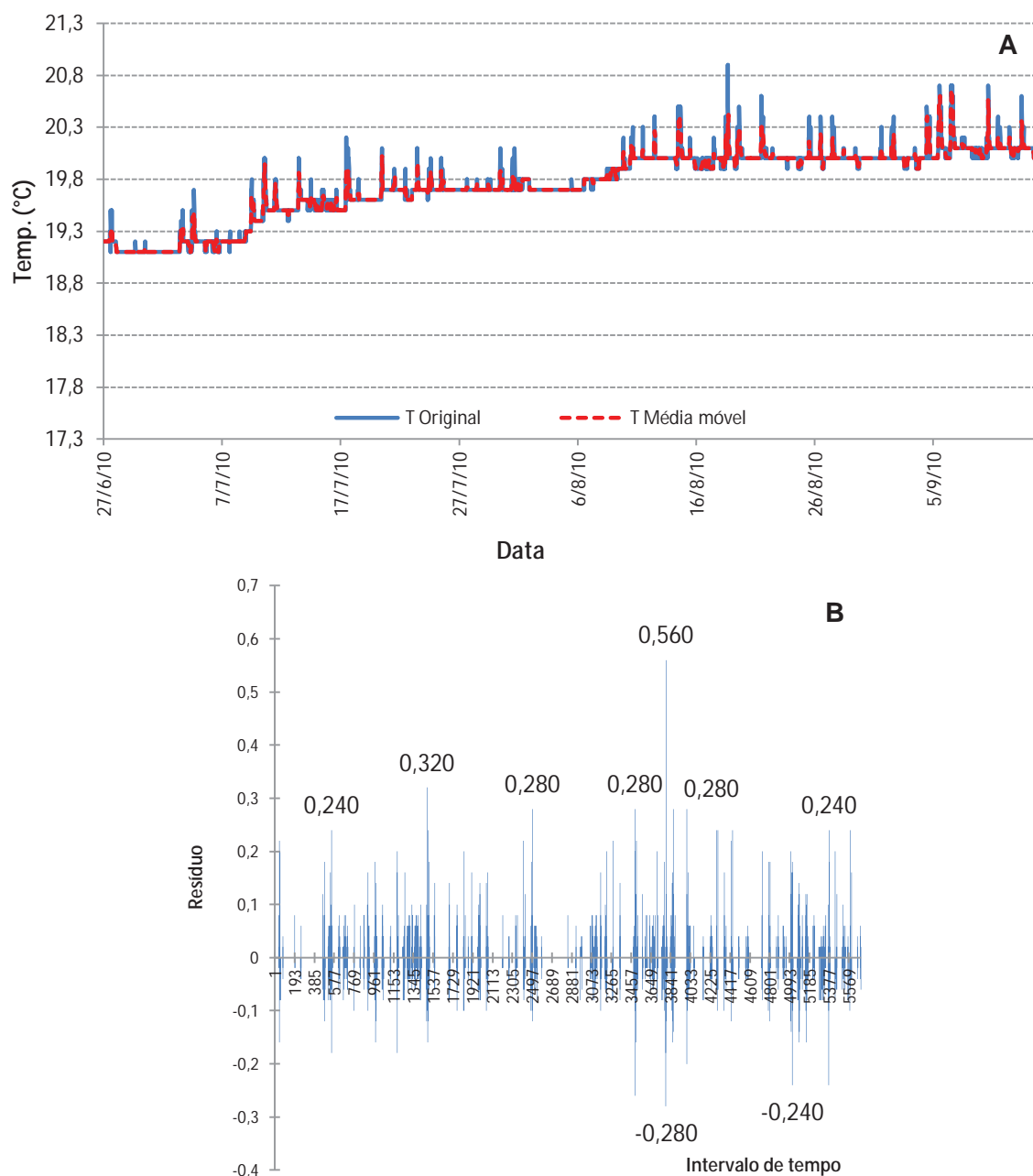


Figura 7.76 – Série original de temperatura do ar e médias móveis correspondentes (A) e respectivo gráfico de resíduos da suavização da série original x média móvel (B), na estação Cristo, para o período entre 27 de junho e 13 de setembro de 2010

As médias móveis da série suavizada (Figura 7.76A) e, principalmente, o gráfico de resíduos (Figura 7.76B) evidenciam as anomalias térmicas registradas na estação Cristo. Os resíduos atingiram grandezas da ordem de 0,2 e 0,3 pontos, chegando ao extremo de 0,560 no dia 18 de agosto, quando houve um aumento repentino de 0,9 °C (de 20 °C para 20,9 °C), cuja estabilização e retorno ao estado de estacionariedade da estação demorou 4h.

Assim como o gráfico de dados brutos (Figura 7.74), as médias móveis também demonstraram que as anomalias térmicas somente ocorrem durante o dia.

Outras análises em maior detalhe, considerando os diferentes períodos do dia e a periodicidade mensal será feitas em seção posterior, quando da análise dos impactos do uso público no espeleoclima da caverna de Santana.

Os dados desta estação também foram analisados por meio das funções de autocorrelação e densidade espectral (Figura 7.77).

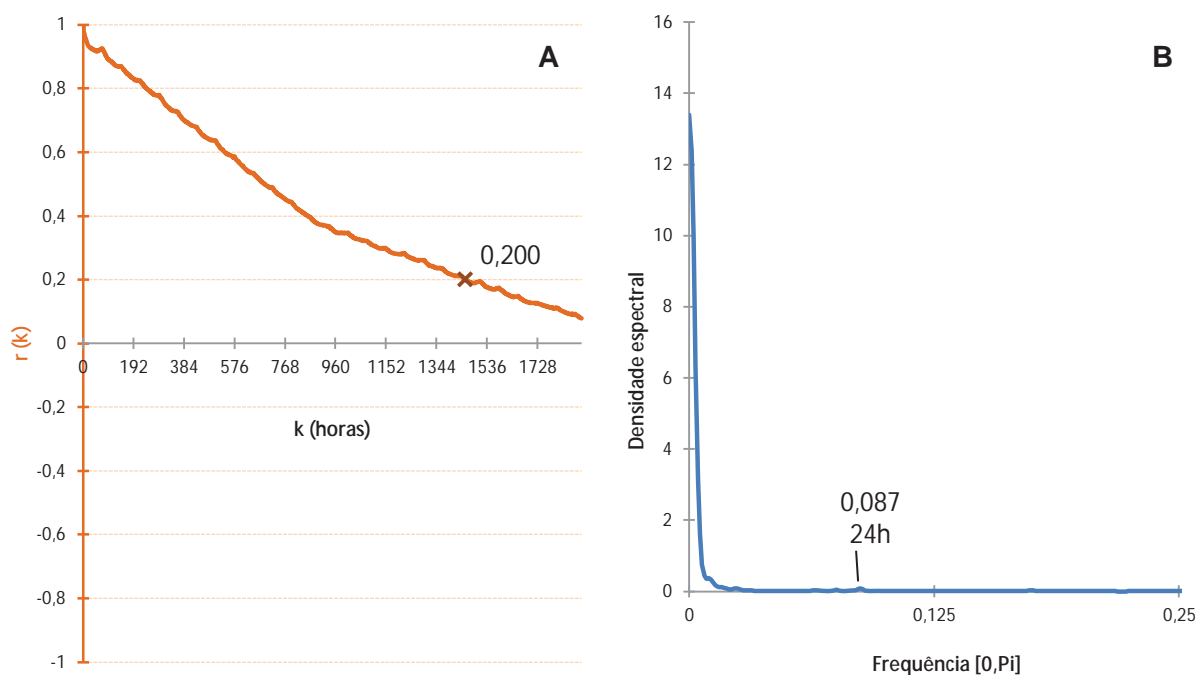


Figura 7.77 – Função de autocorrelação (A) e densidade espectral (B) da série de temperatura da água da estação Rio Verde

O correlograma (Figura 7.77A) demonstrou lento decaimento neste ponto do sistema, demonstrando que, apesar dos fenômenos pontuais de aquecimento do ar registrados em todo o período, a dinâmica deste ponto do sistema atmosférico subterrâneo é menor. Com isso, infere-se mais uma vez a possibilidade de interferência externa no sistema. O efeito de memória foi atingido com 1455h, quando $r = 0,2$.

A densidade espectral (Figura 7.77B) não demonstrou picos elevados em frequências de corte mais altas, a não ser o pico inicial, que inclusive ampliou a escala do eixo y em relação à estação anterior. Uma ciclicidade de 24h pôde ser notada, em frequência de corte e com densidade muito baixas.

7.4. Perfis espeleoclimáticos da caverna de Santana

Os dados apresentados nas subseções 7.2 e 7.3 permitiram um conhecimento inicial sobre a variabilidade espeleoclimática do trecho estudado da caverna de Santana e seu entorno imediato na região da ressurgência do rio Roncador. Das 13 estações de monitoramento apresentadas, apenas 11 serão consideradas nas próximas análises, descartando-se os dados das estações Escada e São Paulo.

Embora a análise de cada uma das estações seja importante, para conhecer a individualidade dos padrões de variação em cada trecho estudado da caverna, a integração dos dados permite uma comparação mais clara acerca da dinâmica atmosférica subterrânea. Para tanto, serão apresentadas duas classes de perfis do ambiente. No perfil temporal, os dados das diferentes estações serão comparados entre si, usando para tanto de interpretações de gráficos e análises estatísticas. Com o uso das funções de autocorrelação e densidade espectral, os dados coletados em distintos períodos também poderão ser comparados. No perfil espaço-temporal, a análise será feita a partir de dados obtidos por meio de um caminhar nas galerias da caverna, com medições em 75 pontos, acrescidas de um sistema bidimensional de coordenadas, processadas por meio de algoritmos de interpolação de dados.

7.4.1. Perfil espeleoclimático temporal da série anual

O perfil térmico temporal das séries completas de dados coletados no monitoramento exploratório é apresentado na Figura 7.78.

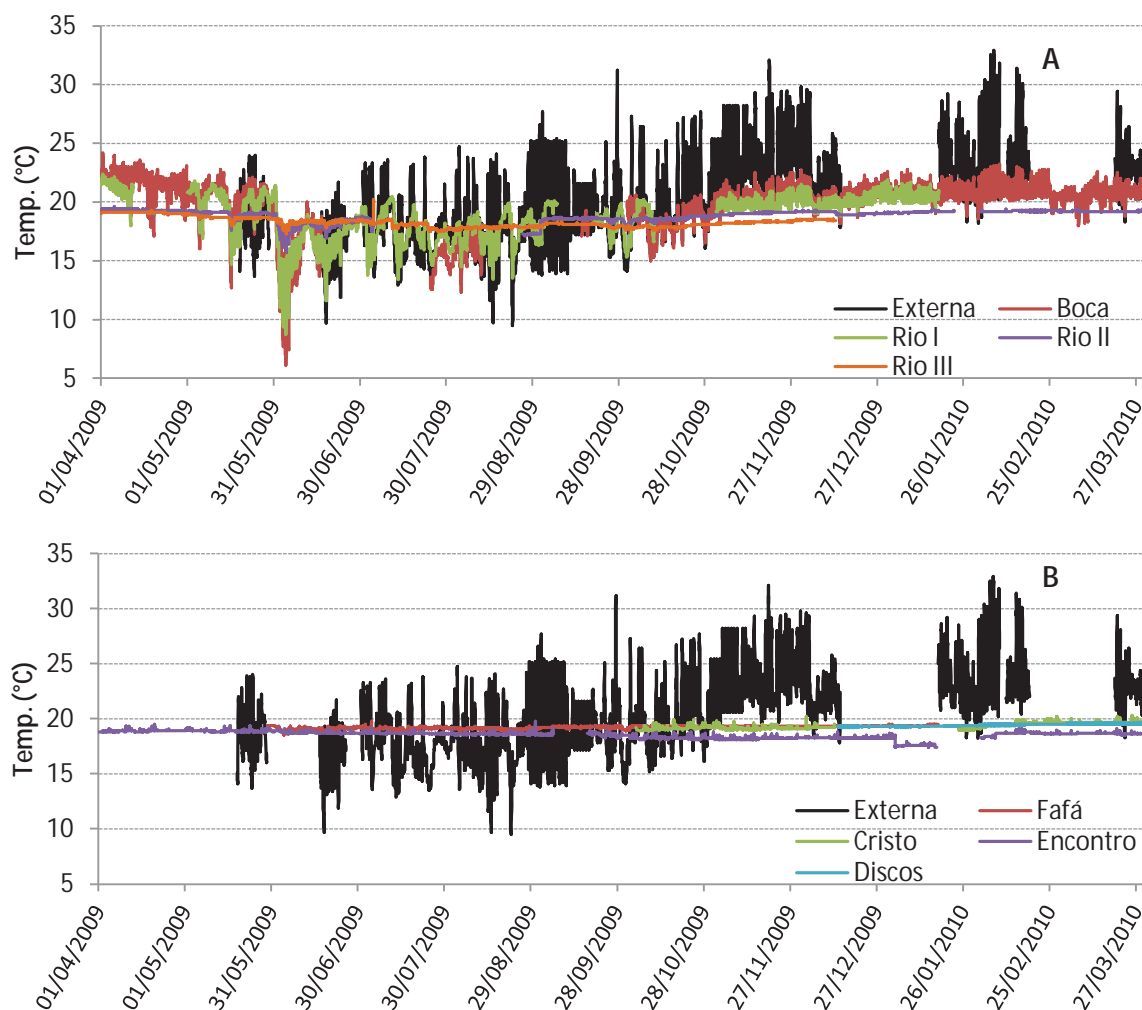


Figura 7.78 – Comparações entre as séries originais anuais: temperatura Externa x temperatura das estações Boca, Rio I, Rio II e Rio III (A) e temperatura Externa x temperatura das estações Fafá, Cristo, Encontro e Discos (B)

Os gráficos da Figura 7.78 permitem uma comparação entre a temperatura externa, considerada como variável independente do sistema, e as possíveis variáveis dependentes, representadas pelas demais simplificações das estações internas da caverna. Com isso, pretende-se analisar, sob diversos aspectos, as relações do sinal de entrada no sistema e suas respostas relativas.

Na Figura 7.78A, as respostas das estações na galeria do rio no sistema atmosférico subterrâneo estudado são evidentes em relação aos sinais de entrada do microclima externo. As variações diurnas são perceptíveis em todas as estações, em proporções menores à medida que se avança ao interior da caverna. O gradiente térmico horizontal gerado por esta dinâmica possui respostas mais evidentes nos extremos de temperaturas mínimas, aspecto já comentado nas análises individuais de cada estação.

Por sua vez, a Figura 7.78B ilustra este mesmo sinal de entrada e sua relação com as estações nas galerias secas superiores. Neste caso, os sinais de resposta tornam-se menos evidentes, à exceção da estação Fafá. Anomalias visuais podem ser observadas nas estações Cristo e Encontro, onde aparecem picos de temperatura sem correlação visual aparente com as demais estações da zona interna ou mesmo com o sinal de entrada externo.

Para auxiliar nas análises das inter-relações entre os dados de todas as estações, a Figura 7.79 apresenta os histogramas de frequência relativa da temperatura.

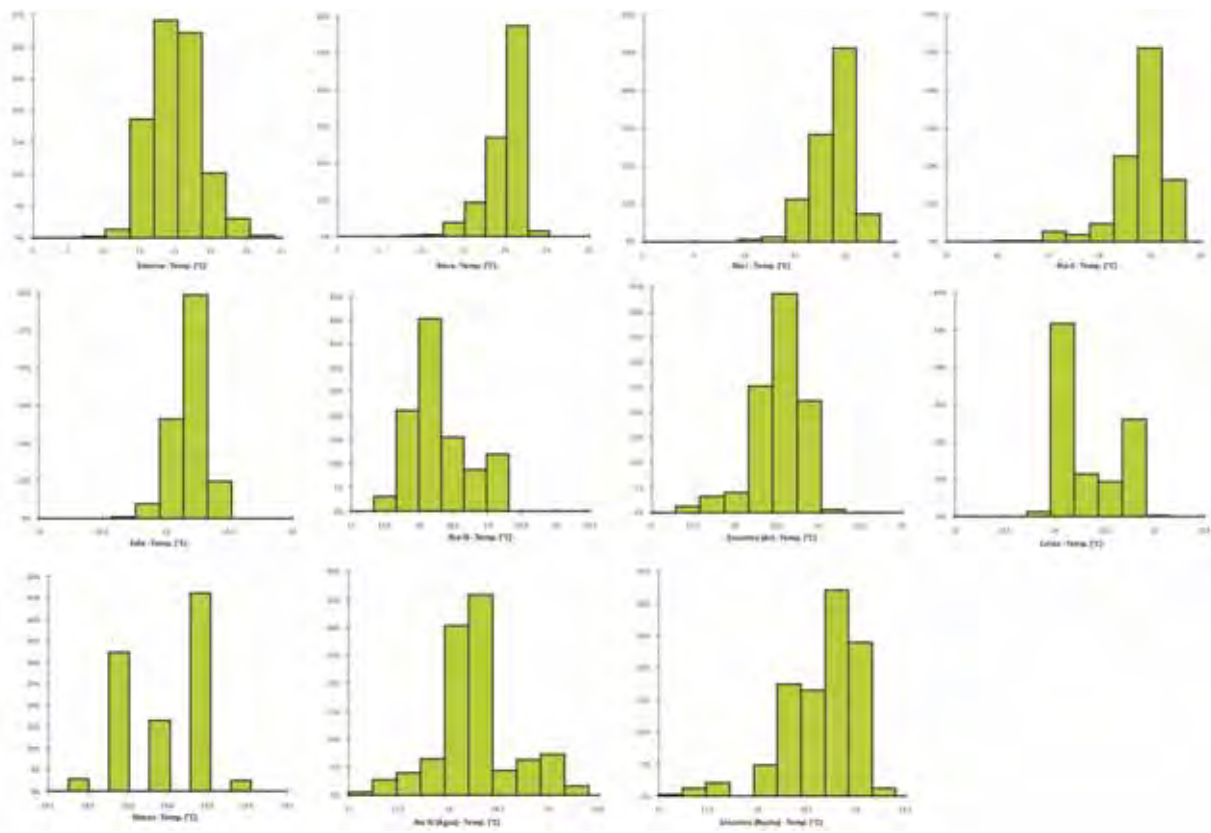


Figura 7.79 – Histograma de frequências relativas para as séries completas de dados de temperatura

Os testes de normalidade da Figura 7.79 demonstram grande assimetria dos dados na maioria das estações. Por outro lado, ilustram também grande semelhança visual entre as estações Boca, Rio I, Rio II, Fafá e, em grau menor, Encontro (ar) e Encontro (rocha), com assimetria negativa. Por outro lado, as estações Externa, Rio III (ar) e Rio III (água) também são semelhantes entre si, com fraca assimetria positiva. As estações Cristo e Discos apresentam padrões diferenciados das demais.

Para verificar as semelhanças e disparidades visuais identificadas, foram realizados testes de correlação entre as variáveis, por meio do coeficiente r de Pearson (Tabela 7.5). Considerando a existência de extensos intervalos de falhas entre os dados, optou-se pela remoção dos dados faltantes, de forma a permitir um grau de comparação sem grandes interferências nos valores obtidos.

Tabela 7.5 – Matriz de proximidade (r de Pearson) entre as variáveis selecionadas (Temp. série anual)

	Externa	Boca	Rio I	Rio II	Fafá	Rio III	Encontro	Cristo	Discos	Rio III Água	Encont. Rocha
Externa	1	0,783	0,756	0,605	0,649	0,349	-0,393	0,178	0,035	0,601	0,070
Boca	0,783	1	0,944	0,893	0,784	0,700	-0,048	0,353	0,040	0,509	0,055
Rio I	0,756	0,944	1	0,846	0,790	0,593	-0,351	0,081	0,179	0,487	0,169
Rio II	0,605	0,893	0,846	1	0,814	0,663	-0,080	0,633	0,723	0,506	0,083
Fafá	0,649	0,784	0,790	0,814	1	0,298	-0,647	0,235	0,136	0,516	0,171
Rio III	0,349	0,700	0,593	0,663	0,298	1	0,484	0,186		0,422	0,523
Encontro	-0,393	-0,04	-0,35	-0,08	-0,64	0,484	1	0,866	0,787	-0,441	0,289
Cristo	0,178	0,353	0,081	0,633	0,235	0,186	0,866	1	0,765	0,121	-0,213
Discos	0,035	0,040	0,179	0,723	0,136		0,787	0,765	1		0,233
Rio III Água	0,601	0,509	0,487	0,506	0,516	0,422	-0,441	0,121		1	0,416
Encontro Rocha	0,070	0,055	0,169	0,083	0,171	0,523	0,289	-0,213	0,233	0,416	1

Os coeficientes de correlação confirmam as fortes ligações entre as séries de dados de temperatura. As influências do microclima externo refletem em maior grau nas estações Boca (0,783), Rio I (0,756), Fafá (0,649), Rio II (0,605) e Rio III água (0,601). A estação Encontro não apresentou correlação com o meio externo (-0,393), bem como a maioria das demais estações. No caso do Encontro, suas ligações mais fortes são com as estações Cristo (0,866) e Discos (0,723). De um modo geral, tratam-se de estações com registros de temperaturas mais elevadas, o que pode ter influenciado nestes resultados. A estação Cristo apresenta maior correlação com as estações Encontro, Discos (0,765) e Rio II (0,633).

Foram também realizadas análises estatísticas descritivas por meio de testes de correlação cruzada entre a estação externa e as internas (Figura 7.80).

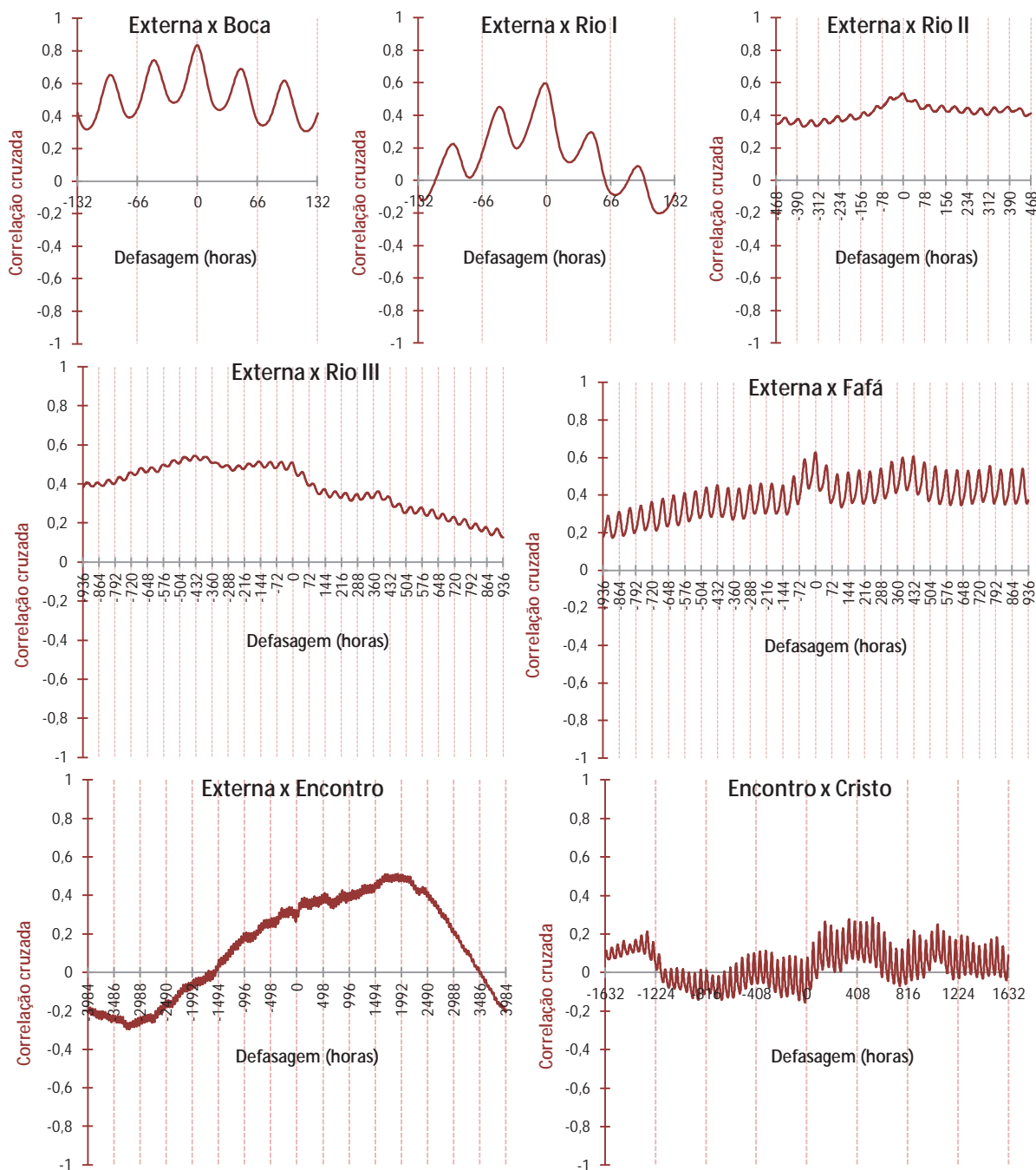


Figura 7.80 – Correlogramas cruzados entre a estação Externa e sete estações internas, considerando intervalos de tempo de monitoramento coincidente e sem falhas nos dados

Nos correlogramas cruzados da Figura 7.80 é possível identificar a existência de correlação positiva em todos os casos entre a estação Externa e as internas selecionadas, em diferentes graus de defasagem. Nas estações Externa e Cristo, mais uma vez se evidenciam anomalias na série, o que pode ser observado gráfico e pelos índices máximos de correlação e os graus de defasagem. Para uma comparação mais direta, os resultados expressos pelos correlogramas são sintetizados na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 – Coeficientes de correlação cruzada no intervalo zero, defasagens e respectivos índices de correlação entre a estação externa e as internas consideradas

Estação Externa x	Variável	Valor
Boca	Correlação (intervalo 0)	0,835
	Defasagem (horas)	(0,835) 0h
Rio I	Correlação (intervalo 0)	0,589
	Defasagem (horas)	(0,597) 2h
Rio II	Correlação (intervalo 0)	0,534
	Defasagem (horas)	(0,536) 1h
Rio III	Correlação (intervalo 0)	0,504
	Defasagem (horas)	(0,545) 435h
Fafá	Correlação (intervalo 0)	0,504
	Defasagem (horas)	(0,510) 4h
Cristo	Correlação (intervalo 0)	0,033
	Defasagem (horas)	(0,285) 533h
Encontro (Ar)	Correlação (intervalo 0)	0,320
	Defasagem (horas)	(0,510) 1872h

A maior parte das estações analisadas reflete em questão de horas as variações do ambiente externo. A primeira exceção, a estação Rio III, pode ser explicada em função de sua correlação com a temperatura da água (Figura 7.81A). O mesmo ocorre, ao menos em parte, também para o salão do encontro, onde se obteve elevada correlação positiva com a temperatura da rocha (Figura 7.81B).

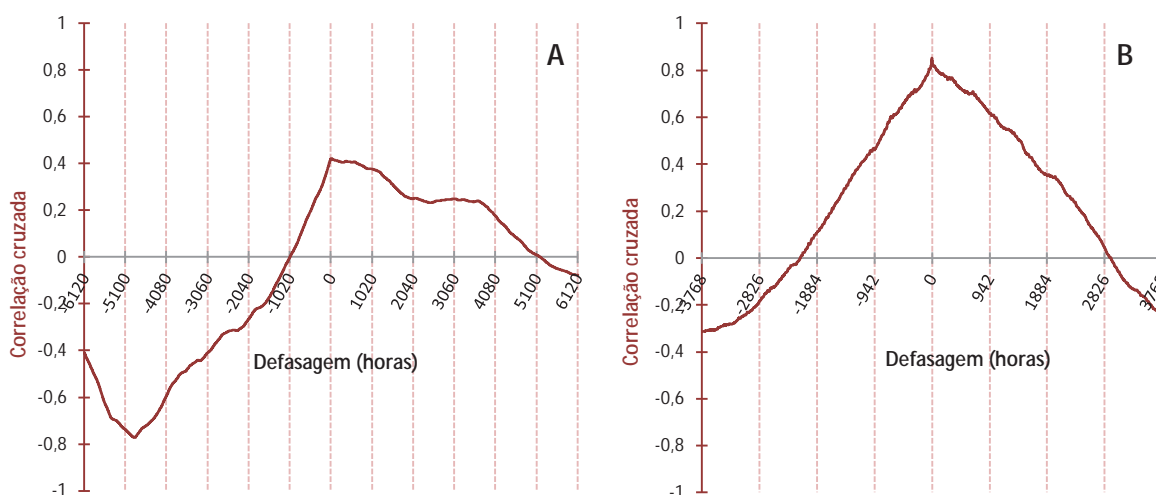


Figura 7.81 – Correlogramas cruzados entre ar e água na estação Rio III (A) e entre ar e rocha na estação Encontro (B)

No caso da estação Rio III, a correlação atingiu 0,422 no intervalo zero. Por sua vez, este índice subiu para 0,851 na estação Encontro.

Conforme já comentado nas subseções anteriores e novamente evidenciado nas análises iniciadas na Figura 7.78, percebe-se a existência de outros fatores

influenciando as variações térmicas nas estações Fafá e Encontro. Uma hipótese será testada em subseção mais a frente (7.8.2), verificando a possível relação entre a presença de visitantes e as variações térmicas no ambiente.

7.4.2. Perfil espeleoclimático temporal da série trimestral de detalhe

A análise integrada dos dados coletados na série trimestral se inicia com os registros de umidade relativa do ar. São considerados prioritariamente os resultados das aferições nas estações Externa, Boca e Rio II (Figura 7.82), dado que nas demais galerias, os registros realizados foram constantes em 99,9%, denotando saturação hídrica do ambiente, conforme comentado nas análises individuais de cada estação.

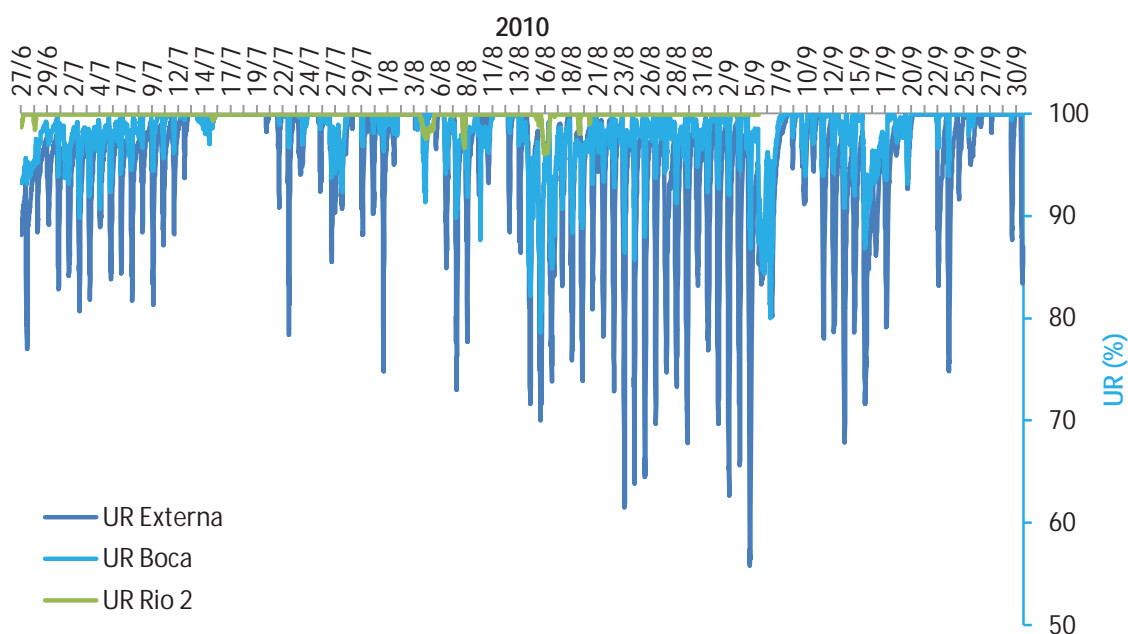
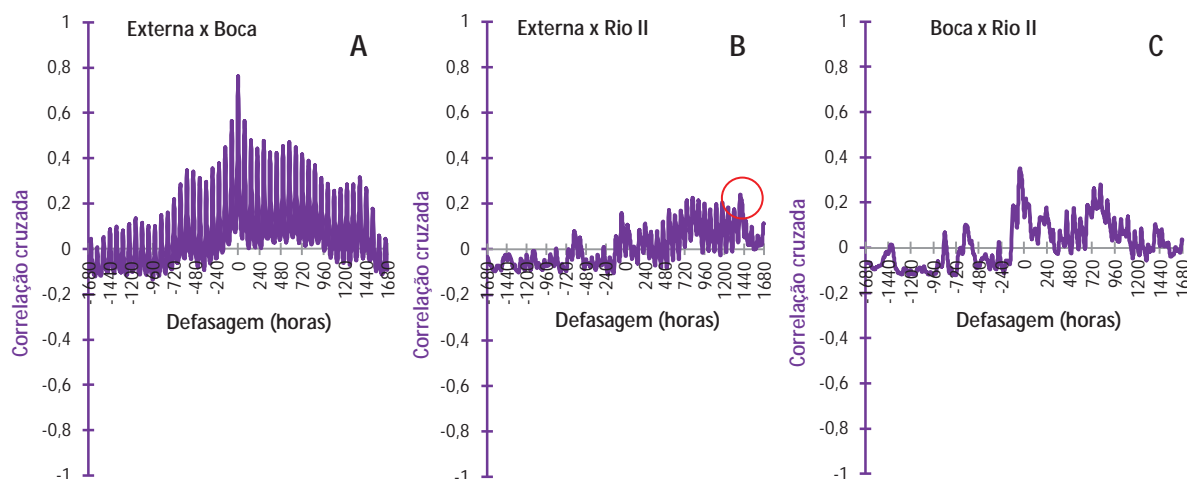


Figura 7.82 – Séries originais de umidade relativa do ar coletadas nas estações Externa, Boca e Rio II (Julho-Setembro/2010)

As variações da umidade relativa do ar possuem aparente relação com a variação no meio externo em alguns momentos do monitoramento, sobretudo na estação Boca. À medida que se avança ao interior da caverna, as variações se atenuam, em função da saturação hídrica da atmosfera da maior parte da caverna de Santana. Não foram registradas variações da umidade relativa do ar para além da estação Rio II na galeria do rio Roncador, levando à compreensão que o limite de interferência do ar relativamente mais seco do meio externo ocorre nas adjacências desta estação. Os coeficientes de correlação (Tabela 7.7) e os correlogramas (Figura 7.83) corroboram estas afirmações.

Tabela 7.7 – Matriz de proximidade (r de Pearson) entre as variáveis selecionadas (UR série trimestral)

	Externa	Boca	Rio II
Externa	1	0,762	-0,028
Boca	0,762	1	0,153
Rio II	-0,028	0,153	1

**Figura 7.83** – Correlogramas cruzados da variabilidade hídrica (estações Externa x Boca e Rio II)

Os coeficientes de correlação (Tabela 7.7) fornecem pistas sobre a interferência direta entre as estações Externa e Boca, com elevado coeficiente de correlação (0,762) entre ambas. Esta relação é corroborada pela correlação cruzada (Figura 7.83A), que demonstra graficamente a elevada correlação entre as duas séries, com índice também de 0,762 no intervalo 0 (zero).

Por outro lado, não é apontada elevada correlação entre a estação Externa e Rio II, tanto pelo coeficiente r de Pearson da Tabela 7.7, que atinge o valor de -0,028, quanto pelo correlação cruzada, que apresenta uma defasagem de 1392h, quando o coeficiente de correlação atinge 0,24 (Figura 7.83B, em destaque). Este padrão demonstra um limite entre as influências do meio externo na saturação hídrica do meio interno, o qual não atinge de forma sistemática a estação Rio II.

Cenário semelhante é apresentado no caso da correlação entre a estação Boca e Rio II. Neste caso, o coeficiente r de correlação também foi baixo, de 0,153 (Tabela 7.7). No caso da correlação cruzada (Figura 7.83C), o coeficiente obtido também foi baixo, de 0,352, com defasagem de -44h.

Estes resultados são coerentes com a análise de agrupamentos (AHC), feita por meio da distância Euclidiana, com uso do método Ward, cujos resultados são apresentados na Figura 7.84.

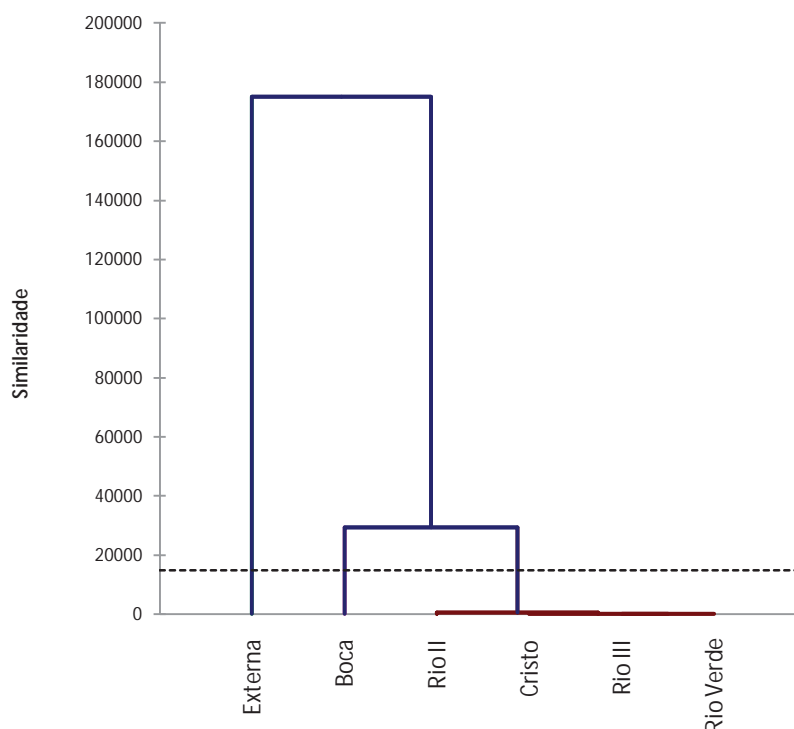


Figura 7.84 – Dendrograma de similaridades entre as séries trimestrais de umidade relativa do ar

A análise de agrupamentos (Figura 7.84) ilustra que a estação Rio II pertence ao grupo de estações cujo padrão mais evidente é a estabilidade hídrica da atmosfera cavernícola, sendo a única estação deste grupo que apresentou valores aferidos abaixo de 99,9%. Estes provavelmente refletem as variações térmicas às quais esta estação está sujeita, por sua maior proximidade com o meio externo.

Desta forma, percebe-se a existência de três zonas hídricas na caverna de Santana: a Externa, a da Boca e parte da galeria do rio e, por fim, a Interna, cuja característica fundamental é a saturação. Estas podem ser representadas pelas três estações analisadas, evidenciando mais uma vez suas diferenças nos padrões de resposta da função de autocorrelação (Figura 7.85).

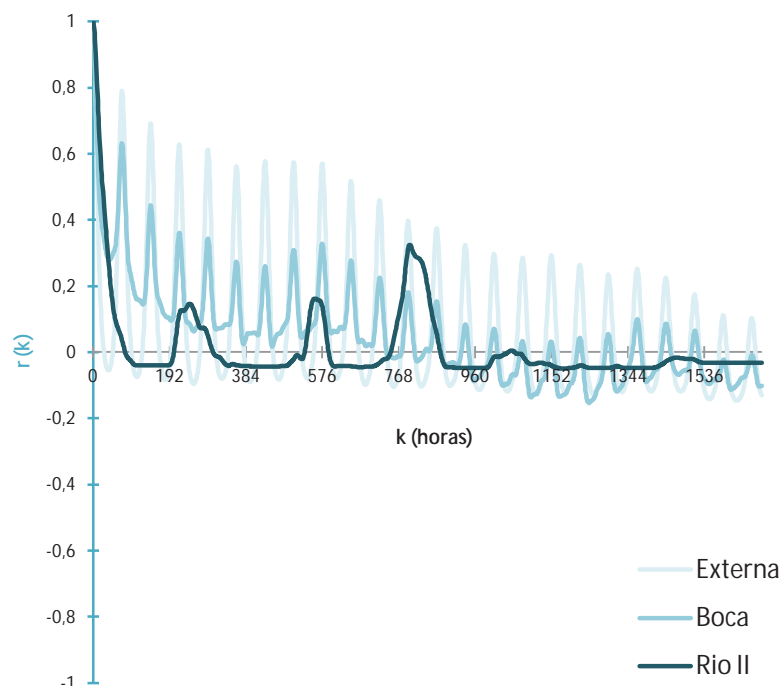


Figura 7.85 – Gráfico comparativo dos correlogramas de umidade relativa do ar das estações Externa, Boca e Rio II

Os correlogramas das três séries ora consideradas como representativas de suas respectivas zonas hígricas apresentam semelhanças e diferenças a serem destacadas. Embora possam ser classificados como pertencentes à distintas zonas hígricas, os correlogramas das estações Externa e Boca apresentam padrões semelhantes de variabilidade, se distinguindo principalmente pelos coeficientes de autocorrelação atingidos. Entretanto, o correlograma da estação Rio II apresenta padrão totalmente diferenciado de variabilidade em relação às demais estações, reforçando a interpretação de se tratar de outra zona hígrica da caverna – embora esteja muito próxima do meio externo.

Na continuidade, as análises integradas para o perfil temporal da série trimestral têm o enfoque dirigido para a temperatura. A Figura 7.86 apresenta a consolidação dos resultados brutos das séries de temperatura do ar e da água.

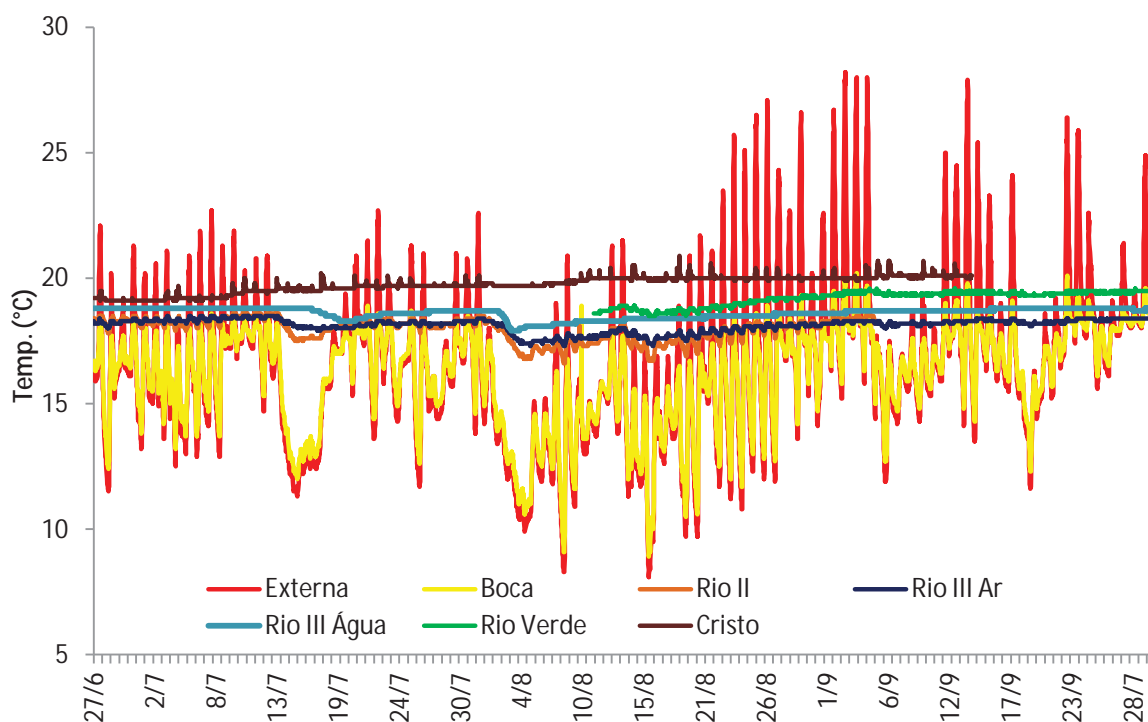


Figura 7.86 – Séries originais de temperatura do ar e da água (Julho-Setembro/2010)

Nota-se grande influência da temperatura do ar externa nas estações Boca, Rio II e Rio III, sobretudo nas quedas de temperatura. A influência visual é menor apenas na estação Rio III, onde a temperatura da água exerce controle sobre a temperatura do ar. Na estação Rio Verde, também se nota a influência do meio externo, embora sua faixa geral de temperatura seja mais elevada. A estação Cristo apresenta um padrão totalmente diferenciado, sem correlação visual com as demais estações. A análise integrada do sistema térmico é mais bem detalhada a partir dos coeficientes de correlação (Tabela 7.8) e da correlação cruzada (Figuras 7.87 à 7.91 e Tabela 7.9). Para esta última análise, foi utilizada a maior série de monitoramento concomitante entre as variáveis estudadas (11 de agosto à 4 de setembro de 2010).

Tabela 7.8 – Matriz de proximidade (r de Pearson) entre as variáveis selecionadas (Temperatura, série trimestral)

	Externa	Boca	Rio II	Rio III_ar	Rio III_água	Rio Verde	Cristo
Externa	1	0,917	0,758	0,726	0,479	0,604	0,191
Boca	0,917	1	0,899	0,854	0,579	0,742	0,172
Rio II	0,758	0,899	1	0,970	0,715	0,903	0,142
Rio III_ar	0,726	0,854	0,970	1	0,803	0,950	0,103
Rio III_água	0,479	0,579	0,715	0,803	1	0,891	0,002
Rio Verde	0,604	0,742	0,903	0,950	0,891	1	0,062
Cristo	0,191	0,172	0,142	0,103	0,002	0,062	1

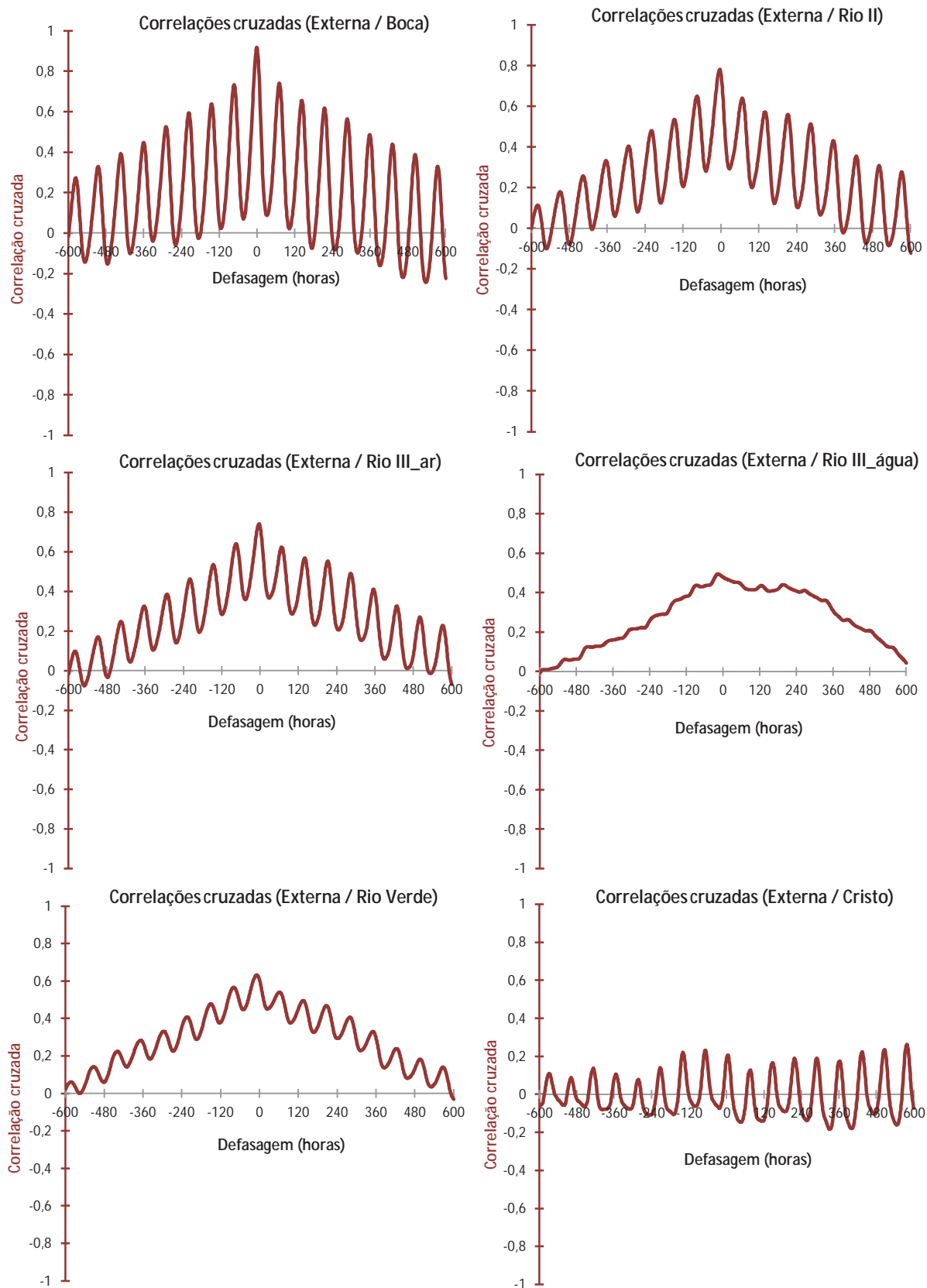


Figura 7.87 – Correlogramas cruzados da variabilidade térmica entre a estação Externa e demais estações monitoradas

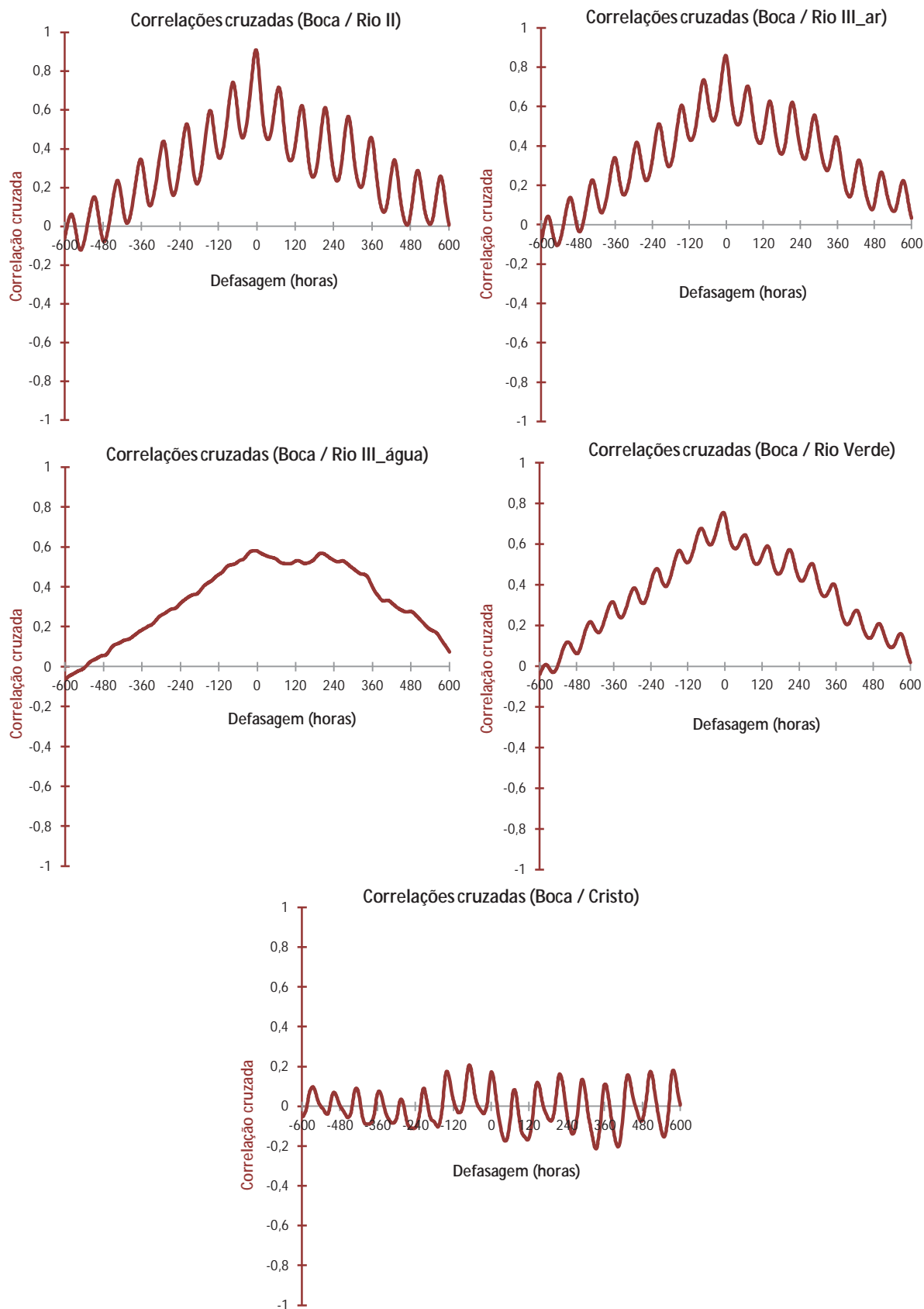


Figura 7.88 – Correlogramas cruzados da variabilidade térmica entre a estação Boca e demais estações monitoradas no interior da caverna de Santana

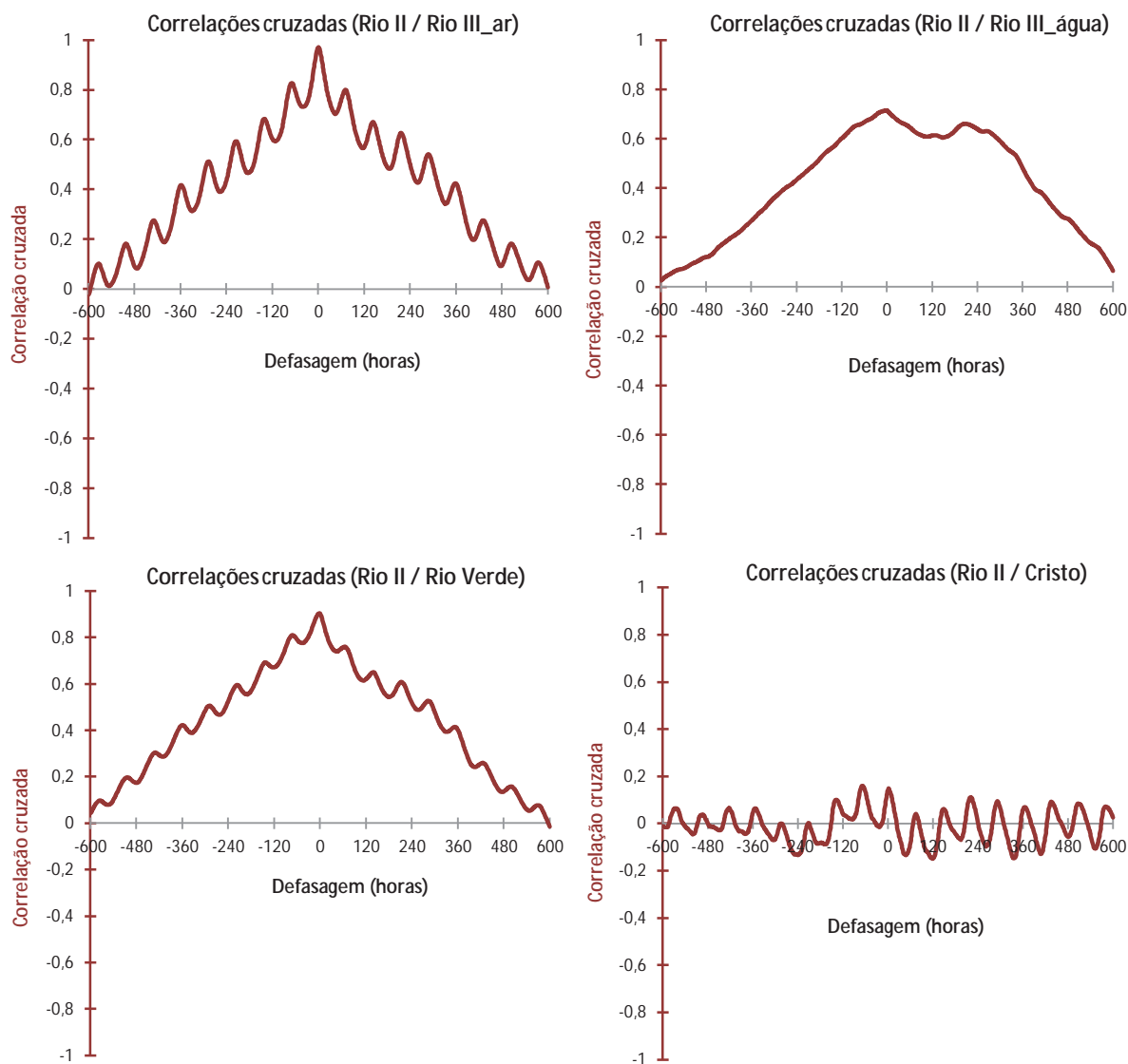


Figura 7.89 – Correlogramas cruzados da variabilidade térmica entre a estação Rio II e as estações Rio III, Rio Verde e Cristo

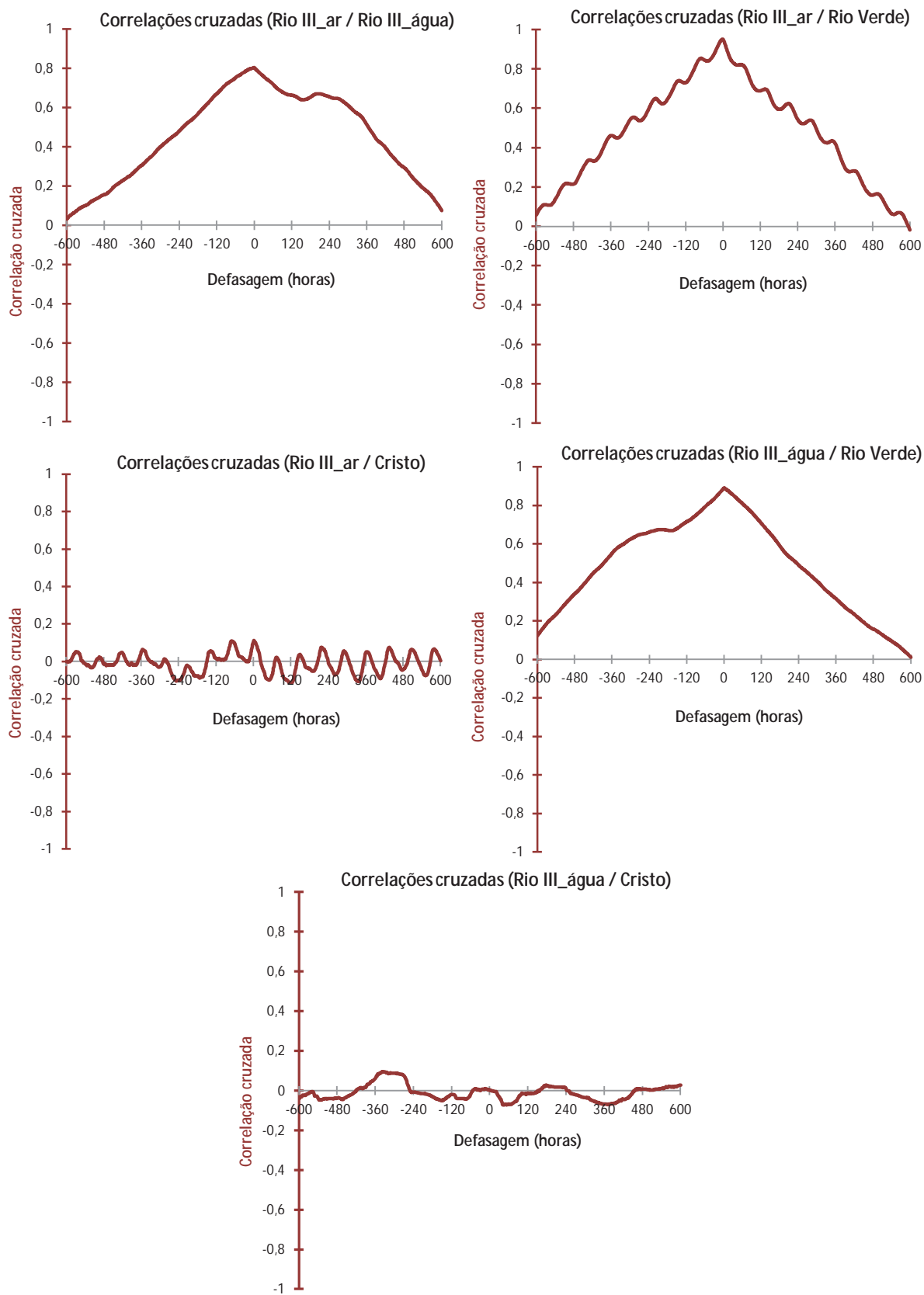


Figura 7.90 – Correlogramas cruzados da variabilidade térmica entre a estação Rio III e as estações Rio Verde e Cristo

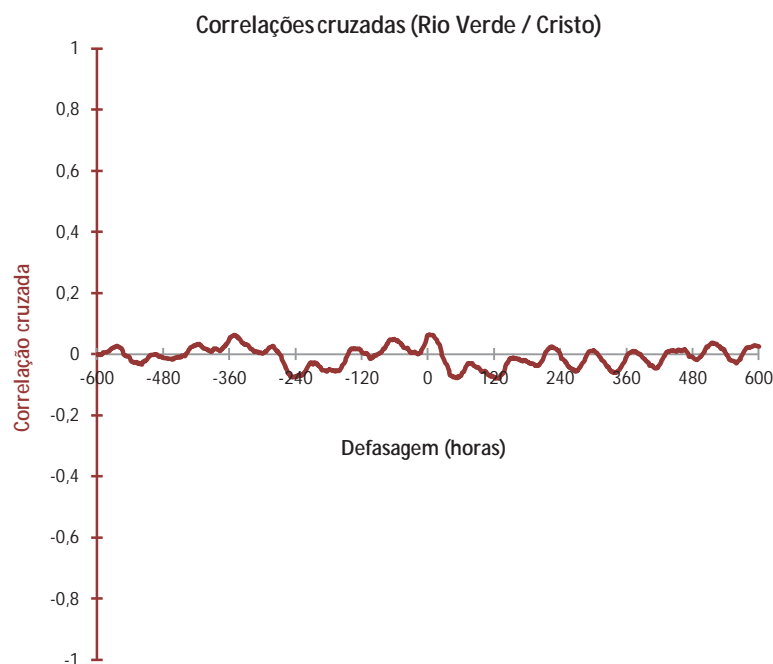


Figura 7.91 – Correlograma cruzado da variabilidade térmica entre as estações Rio Verde e Cristo

Tabela 7.9 – Coeficientes de correlação cruzada entre as séries de temperatura

	Externa		Boca		Rio II		Rio III Ar		Rio III Água		Rio Verde		Cristo	
	Defasagem (h)	Coeficiente	Defasagem (h)	Coeficiente	Defasagem (h)	Coeficiente	Defasagem (h)	Coeficiente	Defasagem (h)	Coeficiente	Defasagem (h)	Coeficiente	Defasagem (h)	Coeficiente
Externa	-	-	0	0,917	-4	0,781	-4	0,741	-17	0,494	-9	0,632	578	0,263
Boca	0	0,917	-	-	-3	0,911	-2	0,859	-12	0,580	-6	0,757	-69	0,208
Rio II	-4	0,781	-3	0,911	-	-	0	0,970	-1	0,715	-2	0,904	-68	0,161
Rio III	-4	0,741	-2	0,859	0	0,970	-	-	0	0,803	-2	0,950	2	0,111
Ar														
Rio III	-17	0,494	-12	0,580	-1	0,715	0	0,803	-	-	0	0,891	-	0,096
Água													339	
Rio	-9	0,632	-6	0,757	-2	0,904	-2	0,950	0	0,891	-	-	129	-
Verde														0,081
Cristo	578	0,263	-69	0,208	-68	0,161	2	0,111	-	0,096	129	-	-	-
									339			0,081		

Os gráficos de correlação cruzada permitem verificar as influências mútuas entre séries de dados, embora não possibilitem, por si só, determinar relações de causa e efeito. Estas são estabelecidas a partir das relações de fluxo atmosférico, considerando os ambiente de maior gradiente energético e movimentação de massa (externo) e os mais estáveis, que guardam variações de longo termo (zonas mais profundas e/ou isoladas de uma caverna).

Partindo desses conceitos pré-estabelecidos, os coeficientes de correlação cruzada para as séries de temperatura são analisados a partir da estação Externa. Tal como percebido na Figura 7.86, as variações térmicas registradas na estação Externa refletem em maior grau nas estações Boca (coeficiente de correlação cruzada = 0,917), Rio II (0,781), Rio III no ar (0,741) e Rio Verde (0,632). Esta variação é guardada, muito provavelmente, nas correlações de variabilidade térmica consequentes entre a estação Boca e as estações Rio II (0,911), Rio III no ar (0,859) e Rio Verde (0,757); a estação Rio II e as estações Rio III no ar (0,970) e Rio Verde (0,904); e finalmente, entre a estação Rio III no ar e Rio Verde (0,950). Todas as correlações ora ressaltadas, dentre as diversas que são observadas na Tabela 7.9 e nas Figuras 7.87 à 7.91, possuem baixa defasagem de tempo na correlação, o que demonstra que, quando as variações de uma estação não refletem de forma imediata na outra – casos onde a defasagem é igual a zero –, estas ocorrem em poucas horas, demonstrando com isso a elevada dinâmica e interação geral do sistema térmico nos primeiros metros da galeria do rio e pontos imediatamente adjacentes na galeria superior na caverna de Santana. Os mesmos graus de significância elevada entre as séries também podem ser observados pelo coeficiente de correlação r de Pearson, da Tabela 7.8.

A temperatura da água do rio Roncador, aferida na estação Rio III, também apresentou influências no sistema térmico da atmosfera da caverna de Santana. Os coeficientes de correlação mais expressivos foram com a estação Rio Verde (0,891), Rio III no ar (0,803) e Rio II (0,715). Chama a atenção o fato de, estatisticamente, a série de temperatura da água do rio apresentar maior correlação cruzada com a estação Rio Verde – localizada na galeria superior ao rio – do que com as estações no próprio rio, como a Rio II e Rio III. A explicação para este fenômeno pode ser encontrada ao se analisar as medidas de tendência central das séries coletadas nestas estações. A média da temperatura da água do rio Roncador foi de 18,61 °C, enquanto que nas estações Rio II e Rio III no ar foi, respectivamente, de 17,98 °C e 18,12 °C. Embora a temperatura da água do rio seja relativamente mais quente, as estações Rio II e Rio III recebem grande influência do meio externo – onde a média no período foi de 16,55 °C –, principalmente nos eventos extremos de queda de temperatura, como já observado na Figura 7.86. Na estação Rio Verde, a média foi de 19,20 °C, com comportamento em gráfico visualmente mais influenciado pelos picos de temperatura do que pelos eventos de esfriamento. Esta temperatura mais

elevada, tanto da estação Rio Verde quanto de outras estações em galerias superiores, quer no monitoramento trimestral, quer nos outros realizados, demonstra a influência das correntes de convecção na estabilidade térmica das galerias superiores na caverna de Santana. No caso em análise, a própria temperatura relativamente mais elevada do rio Roncador em relação ao ar na galeria do rio, faz com que sejam geradas estas correntes, de modo que a influência do rio na estação Rio Verde se torna expressiva, representada pelo alto coeficiente de correlação cruzada entre as séries coletadas.

Por outro lado, descarta-se a influência direta da temperatura do ar na galeria do rio na temperatura da água. Isto porque a água é mais densa que o ar, e sua circulação ocorre de dentro da caverna para fora, atuando como um dispersor de fluxo energético. Porém, a temperatura do ar no ambiente externo influencia na temperatura da água que adentra no sistema Pérolas-Santana, o que pode ser percebido nas quedas de temperatura da água no rio Roncador, que ocorrem em um intervalo de horas ou dias após as quedas de temperatura no meio externo.

Existe também um limite de influência a ser considerado, da temperatura do ar no interior da caverna em suas adjacências imediatas, afetando, inclusive, a estação Externa. Fenômenos como o registrado no dia 9 de agosto, já comentado na análise das estações Externa, Boca e Rio II, ilustram este fato, além de outras variações menos pontuais observáveis na Figura 7.86.

Registra-se também a falta de correlação entre a série de temperatura da estação Cristo com todas as demais estações, o que evidencia que o padrão de variabilidade registrado nesta estação não é fruto de um processo natural do sistema.

As relações de correlação por meio do coeficiente r de Pearson (Tabela 7.8) e dos coeficientes de correlação cruzada (Tabela 7.9) são coerentes com a perspectiva de divisão da caverna em zonas atmosféricas, obtidas pela análise de agrupamentos hierárquicos (AHC), feita por meio da distância euclidiana com uso do método Ward (Figura 7.92).

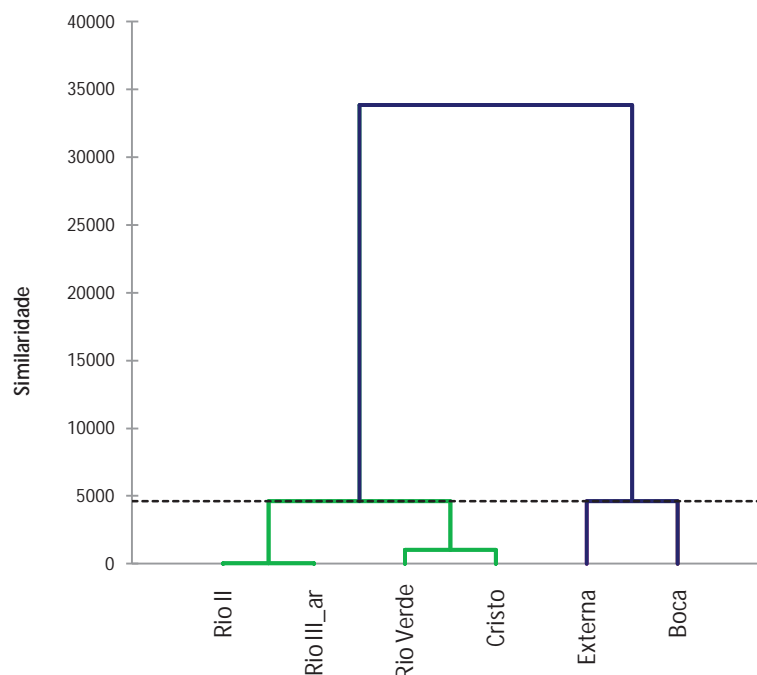


Figura 7.92 – Dendrograma de similaridades entre as séries trimestrais de temperatura do ar

A análise de agrupamentos (Figura 7.92) levou a criação de três principais grupos considerando as estações analisadas. O primeiro deles ficou com a estação Externa e o segundo com a estação Boca. O terceiro grupo inclui as demais estações, podendo ainda ser dividido em dois sub-grupos: o das estações da galeria do rio (Rio II e Rio III no ar) e o da galeria superior (Rio Verde e Cristo). Os grupos obtidos foram coerentes também com os grupos de variabilidade hídrica, já comentados anteriormente (Figura 7.84).

Outro aspecto relevante na diferenciação destas séries de dados e, por consequência, na obtenção de zonas baseadas nos padrões de variabilidade térmica, são as diferenças nos padrões de autocorrelação (Figura 7.93).

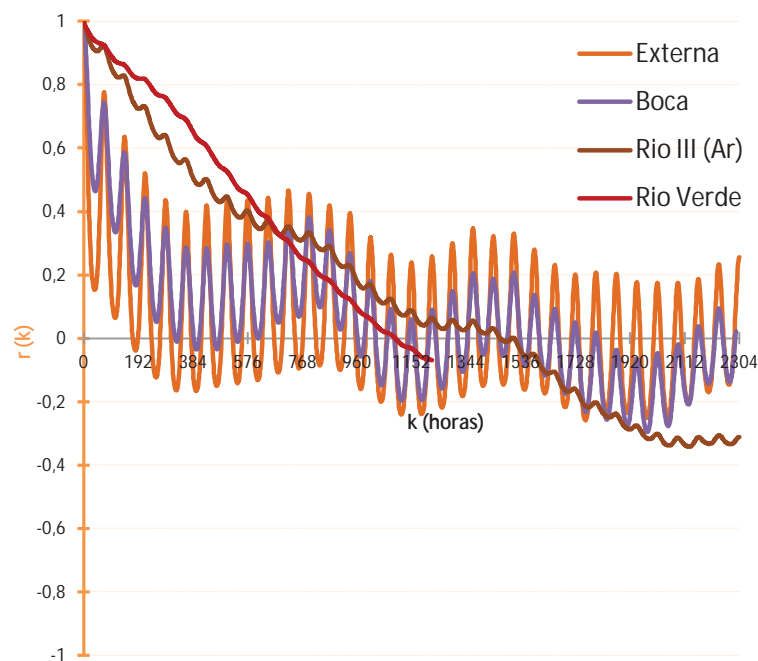


Figura 7.93 – Gráfico comparativo dos correlogramas de temperatura do ar de pontos nas três zonas térmicas obtidas no dendrograma da AHC

Embora os correlogramas das séries de temperatura (Figura 7.93) possuam tamanhos distintos, torna-se possível comparar os seus padrões de variação, ressaltando suas semelhanças e diferenças. O correlograma da estação Externa é o que apresenta o decaimento mais rápido, sendo seguido pelo correlograma das estações Boca, Rio Verde e Rio III Ar. O padrão de variabilidade do ciclo diuturno pode ser visualizado nos quatro correlogramas, sendo bastante evidente nas estações Externa e Boca e em menor intensidade na estação Rio Verde. Resguardadas a amplitude da variabilidade e a velocidade no decaimento, as estações Externa e Boca são bastante semelhantes entre si, o que as aproxima até mesmo nas análises de agrupamentos da Figura 7.92.

De forma a sintetizar graficamente as análises de correlação cruzada, foi elaborado um mapa que demonstra as principais relações encontradas e que fornecem pistas fundamentais para a modelagem de circulação de ar na caverna de Santana e sua relação com os impactos da visitação. Para a elaboração deste mapa, foram considerados os coeficientes de correlação cruzada das duas fases principais do monitoramento (anual e trimestral), privilegiando sempre as correlações mais evidentes – mas não necessariamente os coeficientes mais elevados. O resultado é apresentado na Figura 7.94.



Figura 7.94 – Mapa dos principais coeficientes de correlação cruzada

Além dos aspectos já comentados acerca dos limites de interferência direta do microclima externo no interior da caverna, bem como da influência da temperatura da água do rio Roncador, a Figura 7.94 evidencia também uma forte correlação positiva entre as estações Cristo e Encontro. Isto reforça a hipótese levantada anteriormente, de influência de fatores externos ao sistema nestas estações. Além disso, a estação Encontro também possui forte correlação positiva com a estação Discos, o que permite levantar a hipótese de que está no limite de uma zona atmosférica da caverna em contato com uma zona mais estável, à qual pertence a estação Discos.

Demais comentários e interpretações acerca da dinâmica do sistema atmosférico da caverna de Santana serão feitos posteriormente, após a apresentação dos demais resultados, no Capítulo 8.

7.5. Monitoramento das Concentrações de Gás Carbônico

Os monitoramentos da variação nas concentrações de CO₂ tiveram seus primeiros testes realizados em novembro e dezembro/2009, para ajustes de posicionamento de instrumentos em campo e identificação de locais que permitissem a identificação de variações tanto naturais quanto induzidas. Os dados destes primeiros testes não foram aproveitados, devido à sua baixa continuidade temporal e grandes interferências da presença do pesquisador nos resultados.

Os monitoramentos começaram a ser realizados em janeiro/2010, nas estações Bacon e Cristo. Para a estação Bacon, foram obtidos quatro perfis temporais neste período, com dados de CO₂, temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica, devido às características do instrumento multiparâmetro utilizado. Para a estação Cristo, obteve-se apenas um perfil e somente de CO₂, dado que o instrumento utilizado apresentou problemas em seu relógio interno, que não foram solucionados até o término da pesquisa. Estes perfis possuem baixa extensão temporal, dado o alto consumo de energia dos sensores em infravermelho, necessários para uma adequada leitura do CO₂. Em ambos os instrumentos, foram adaptadas baterias externas para aumentar a capacidade habitual de funcionamento, ampliando as coletas de no máximo 25h (baterias originais) para até sete dias contínuos. Para contornar parcialmente este problema, a resolução temporal da coleta foi reduzida, dos 30min do monitoramento termohigrométrico

para 10min e 5min no caso do CO₂. Os resultados obtidos são apresentados em um padrão mensal, por meio de gráficos e análises estatísticas básicas.

No mês de janeiro/2010 as coletas foram iniciadas no dia 17, estendendo-se até o dia 2 de fevereiro, no caso da estação Cristo. Primeiramente, são apresentados os gráficos da estação Bacon, nas Figuras 7.95 e 7.96.

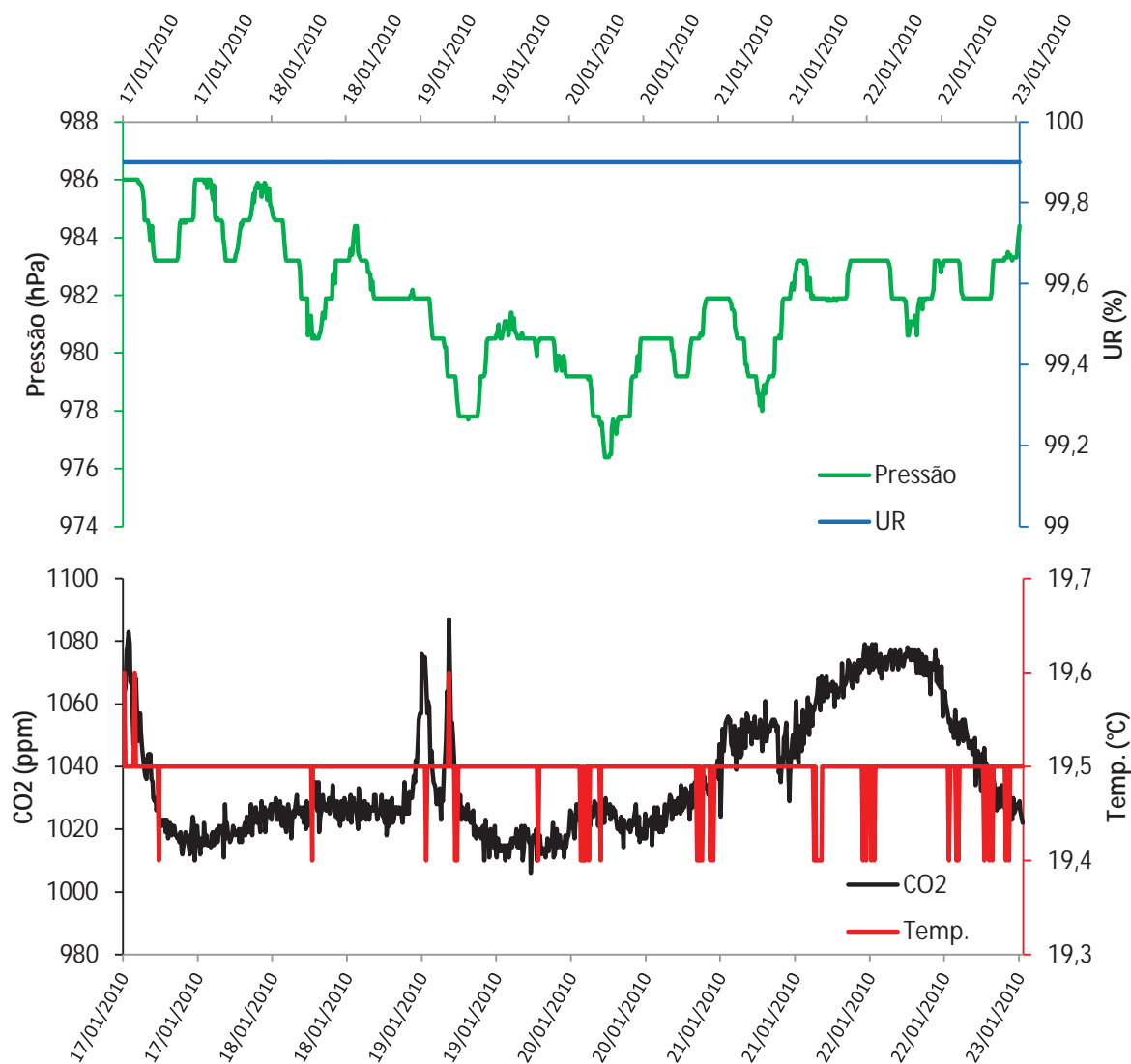


Figura 7.95 – Monitoramento multi-paramétrico (CO₂, temp., UR e pressão) na estação Bacon, entre os dias 17 e 23 de janeiro de 2010

Entre os dias 17 e 23 de janeiro/2010 (Figura 7.95), o CO₂ atingiu valor máximo de 1087 ppm e mínimo de 1006 ppm. Três grandes picos foram detectados nos dias 17 e 19, além de uma variação sazonal mais ampla no eixo x, entre os dias 20 e 23. Não há correlação aparente com os demais parâmetros para todas as variações de CO₂. No entanto, nos picos dos dias 17 e 19 houve aumento também

da temperatura do ar, fato que não se repete na variação mais ampla dos dias 20 a 23. A umidade relativa do ar permaneceu em 99,9% e a pressão atmosférica variou menos de 10 hPa no período.

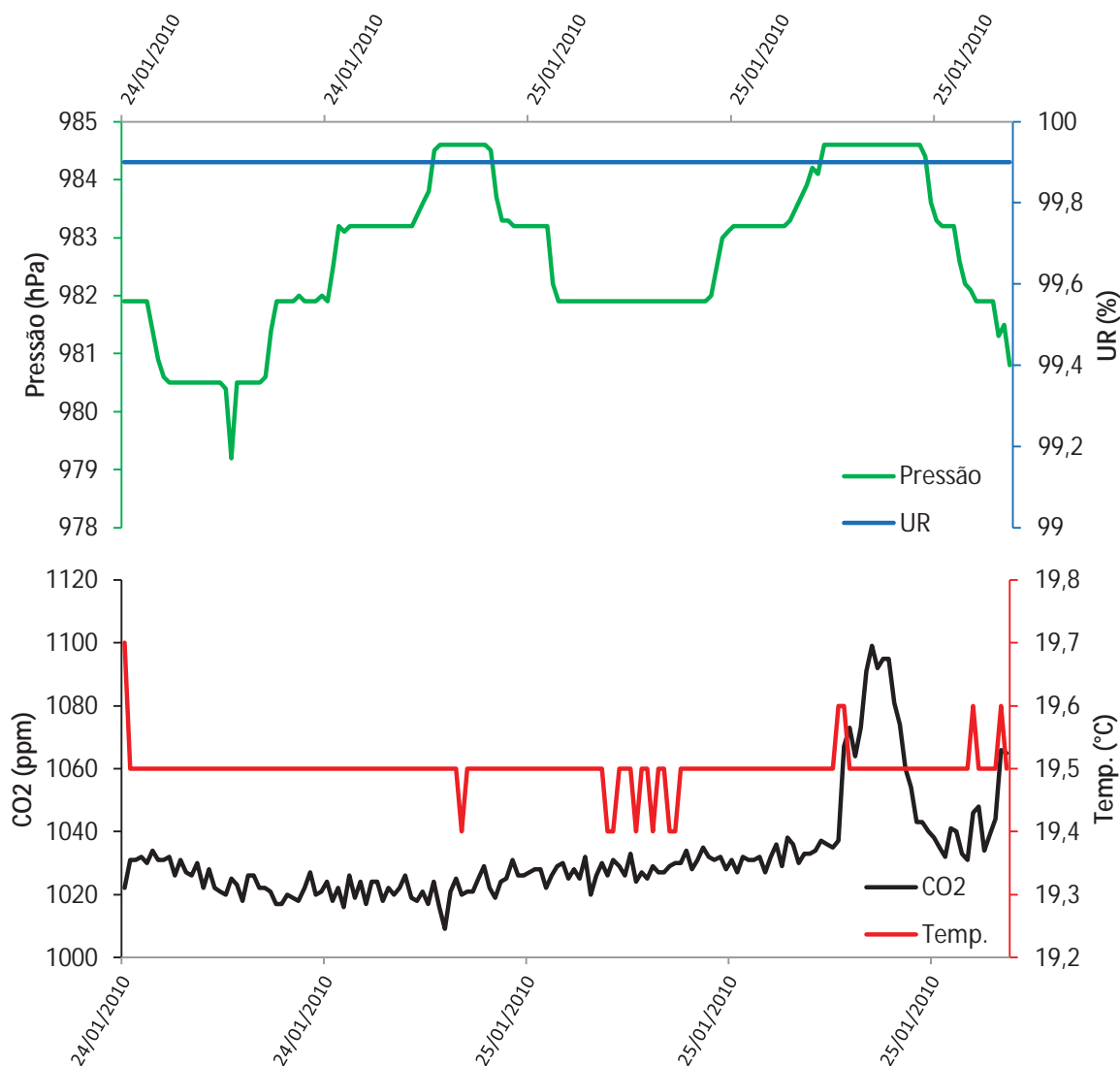


Figura 7.96 – Monitoramento multi-paramétrico (CO₂, temp., UR e pressão) na estação Bacon, entre os dias 24 e 25 de janeiro de 2010

No segundo período do mês de janeiro, de apenas dois dias, o CO₂ atingiu valor máximo de 1099 ppm e mínimo de 1009 ppm na estação Bacon (Figura 7.96). Um único pico foi registrado no período, no dia 25, sem correlação aparente com os demais parâmetros. A pressão teve variações da ordem de 5 hPa, a temperatura do ar de 0,3 °C e a umidade relativa se manteve em 99,9%.

Ainda no mês de janeiro, foi realizado monitoramento de CO₂ na estação Cristo. Os resultados são apresentados na Figura 7.97.

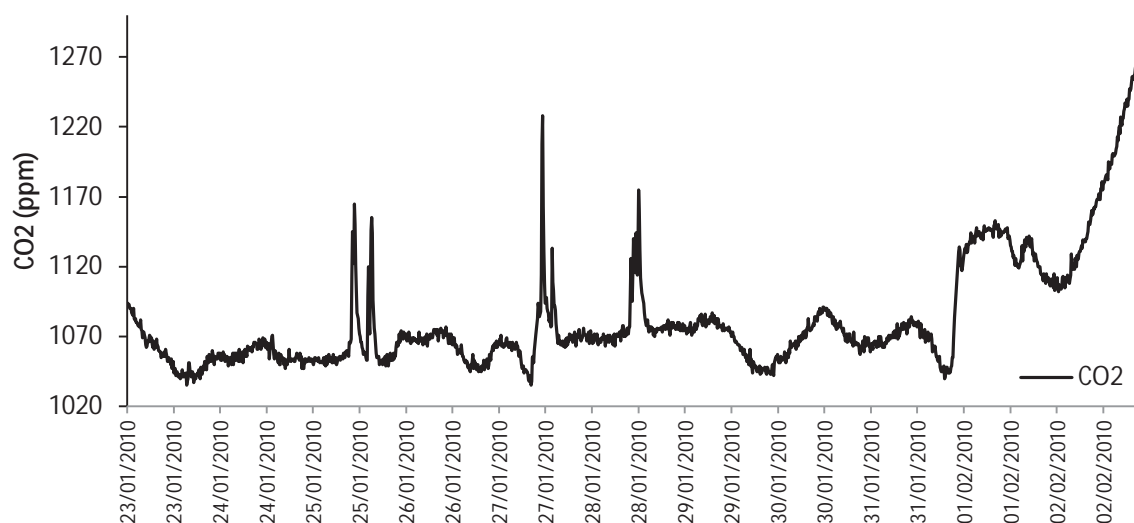


Figura 7.97 – Monitoramento de CO₂ na estação Cristo, entre os dias 23 de janeiro e 2 de fevereiro de 2010

O CO₂ na estação Cristo apresentou diversos picos no período aferido (Figura 7.97). A máxima registrada foi de 1294 ppm e a mínima de 1102 ppm, com uma amplitude de 192 ppm no período. Nos dias 24 e 25, os picos na estação Cristo foram coincidentes aos da estação Bacon, o que se observa na Figura 7.98.

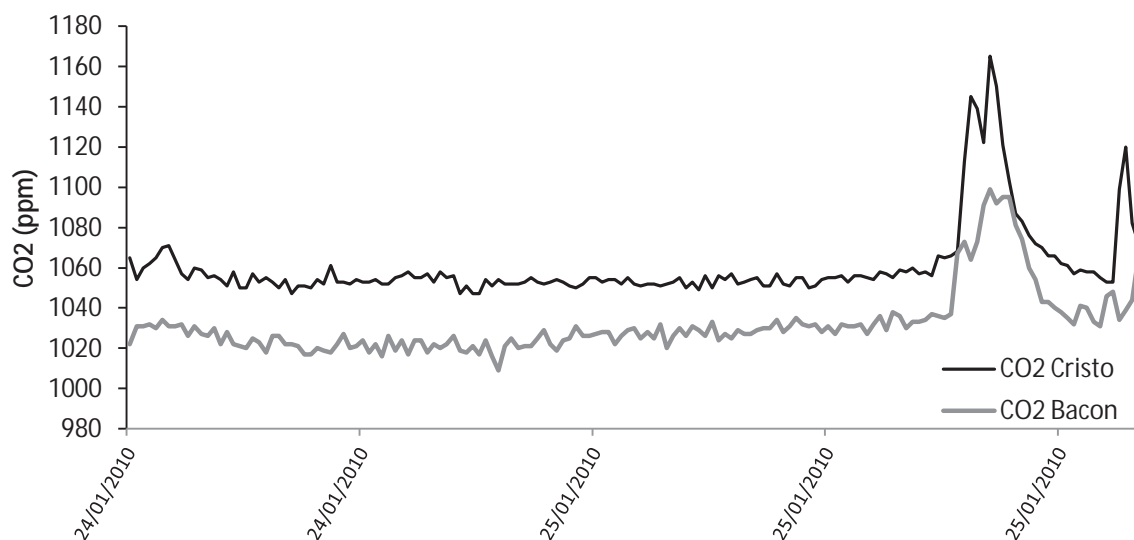


Figura 7.98 – Séries parciais do monitoramento de CO₂ nas estações Bacon e Cristo, nos dias 24 e 25 de janeiro de 2010

As séries parciais apresentadas na Figura 7.98 evidenciam a extensão de um fenômeno de variação na concentração de CO₂ no dia 25, entre 9h 50min e 12h 20min em Bacon – com amplitude da ordem de 60 ppm. Na estação Cristo, o

fenômeno se expressa de forma mais evidente entre 10h e 12h, com aproximadamente 70 ppm de amplitude. No entanto, entre 9h 20min e 9h 50min, a estação já apresentava uma amplificação da ordem de 10 ppm em relação a média do período entre o início do monitoramento e as 9h 10min do dia (1068 ppm, em relação à média de 1056 ppm).

No mês de fevereiro/2010, obteve-se nova série de dados, na estação Bacon, entre os dias 9 e 13 (Figura 7.99).

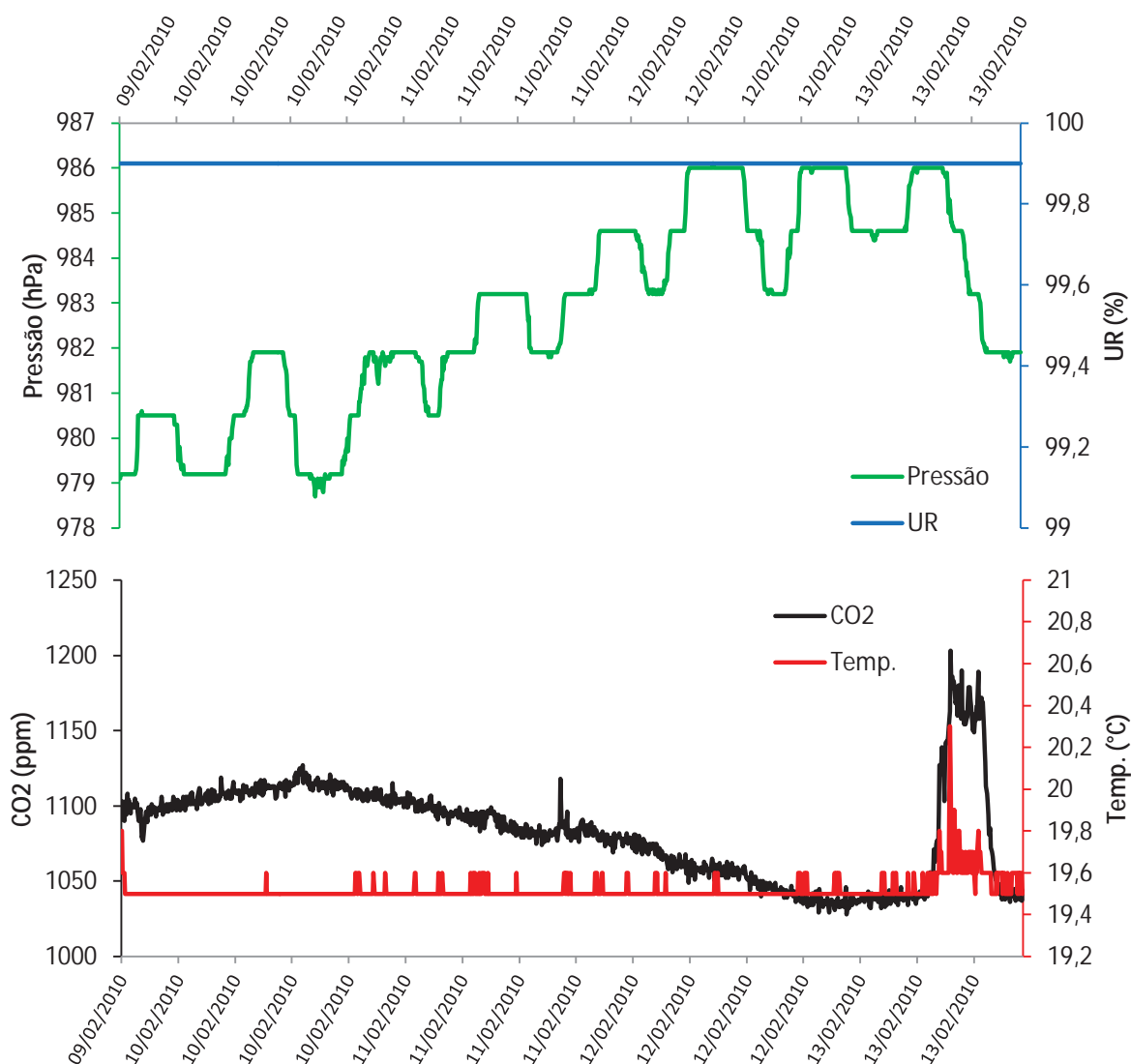


Figura 7.99 – Monitoramento multi-paramétrico (CO₂, temp., UR e pressão) na estação Bacon, entre os dias 9 e 13 de fevereiro de 2010

A variação de CO₂ na estação Bacon no período monitorado em fevereiro/2010 (Figura 7.99) foi de 175 ppm, com mínima de 1028 ppm e máxima de 1203 ppm. Não houve correlação aparente entre a variabilidade de CO₂ e a umidade

relativa do ar ou a pressão atmosférica. No entanto, no dia 13 foi registrada uma amplitude de CO₂ da ordem de 190 ppm, visualmente correlacionada a uma amplitude de 1 °C na temperatura do ar.

Por fim, o último monitoramento temporal de CO₂, no mês de março, entre os dias 20 e 23, cujos resultados são apresentados na Figura 7.100.

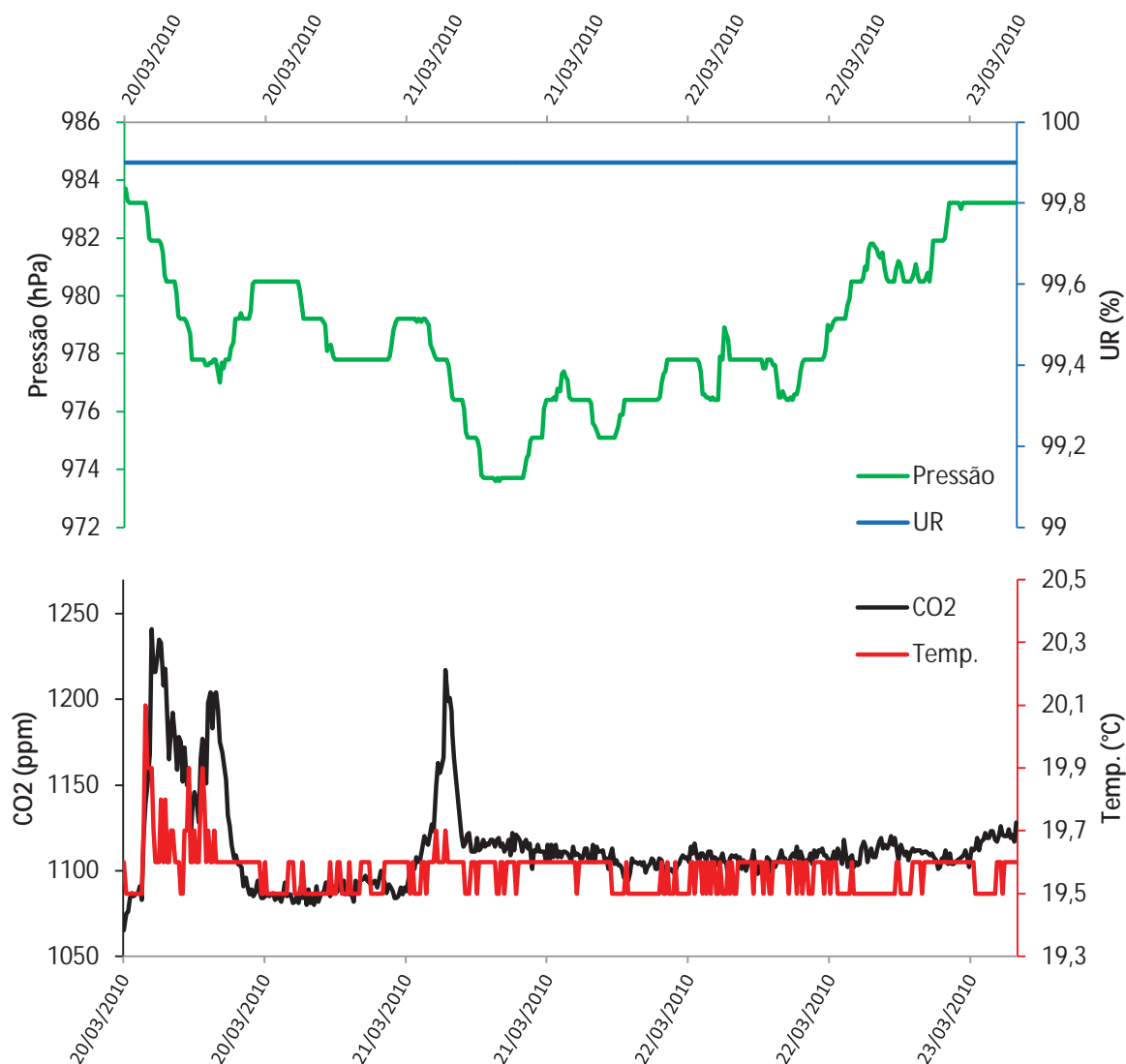


Figura 7.100 – Monitoramento multi-paramétrico (CO₂, temp., UR e pressão) na estação Bacon, entre os dias 20 e 23 de março de 2010

O monitoramento de CO₂ no mês de março/2010 durou apenas três dias (Figura 7.100), em virtude de falhas no sistema de alimentação de energia do instrumento. Neste período, dois grandes picos foram registrados, sendo o primeiro no dia 20, da ordem de 140 ppm e o segundo, no dia 21, da ordem de 130 ppm. Apenas no primeiro pico houve correlação visual entre o CO₂ e a temperatura do ar,

que se elevou em 0,6 °C. Foi também no primeiro pico que o maior valor do período foi registrado, de 1241 ppm. O valor mínimo foi de 1065 ppm, gerando uma amplitude de 176 ppm no período. Não há relação aparente entre estas variações e os valores aferidos de pressão atmosférica e umidade relativa do ar.

Em todos estes perfis temporais de CO₂, representados nas Figuras 7.95 a 7.100, as únicas correlações de variação entre os parâmetros aferidos foram em relação à temperatura do ar. Desta forma, mais uma vez se levantam indícios sobre a interferência da visitação turística nos dados. Estas questões serão mais detalhadas na subseção 7.8.2. e no capítulo 8, onde serão correlacionados os dados atmosféricos com os dados de fluxo de visitação disponíveis.

7.6. Perfil espaço-temporal multivariado

Além dos dados de monitoramento em pontos fixos com variação temporal, foi dada atenção também para a variabilidade espacial dos parâmetros atmosféricos na caverna de Santana. Isto porque, embora o monitoramento temporal permita o conhecimento da dinâmica atmosférica em determinados pontos pré-estabelecidos, ele é limitado quanto a exprimir a variabilidade espacial dos parâmetros considerados. Com isso, as tendências de acúmulo ou dispersão dos ambientes subterrâneos deixam de ser conhecidas, prejudicando avaliações fundamentais que futuramente servirão de parâmetros para a capacidade de carga.

Visando diminuir este problema, foram realizados perfis atmosféricos com as variáveis: temperatura e umidade relativa do ar, CO₂ e pressão atmosférica, considerando dois padrões distintos: uma rede de 75 pontos no perfil de abril/2010 e de 45 pontos no de janeiro/2011. Nesta seção, são apresentados os dados de temperatura do ar e pressão atmosférica, dada a baixa variabilidade da umidade relativa do ar. Os perfis de CO₂ são apresentados na próxima seção.

Primeiramente, são apresentadas as cartas de isotermas, nas Figuras 7.101 e 7.102, elaboradas com algoritmos de superfície de tendência.

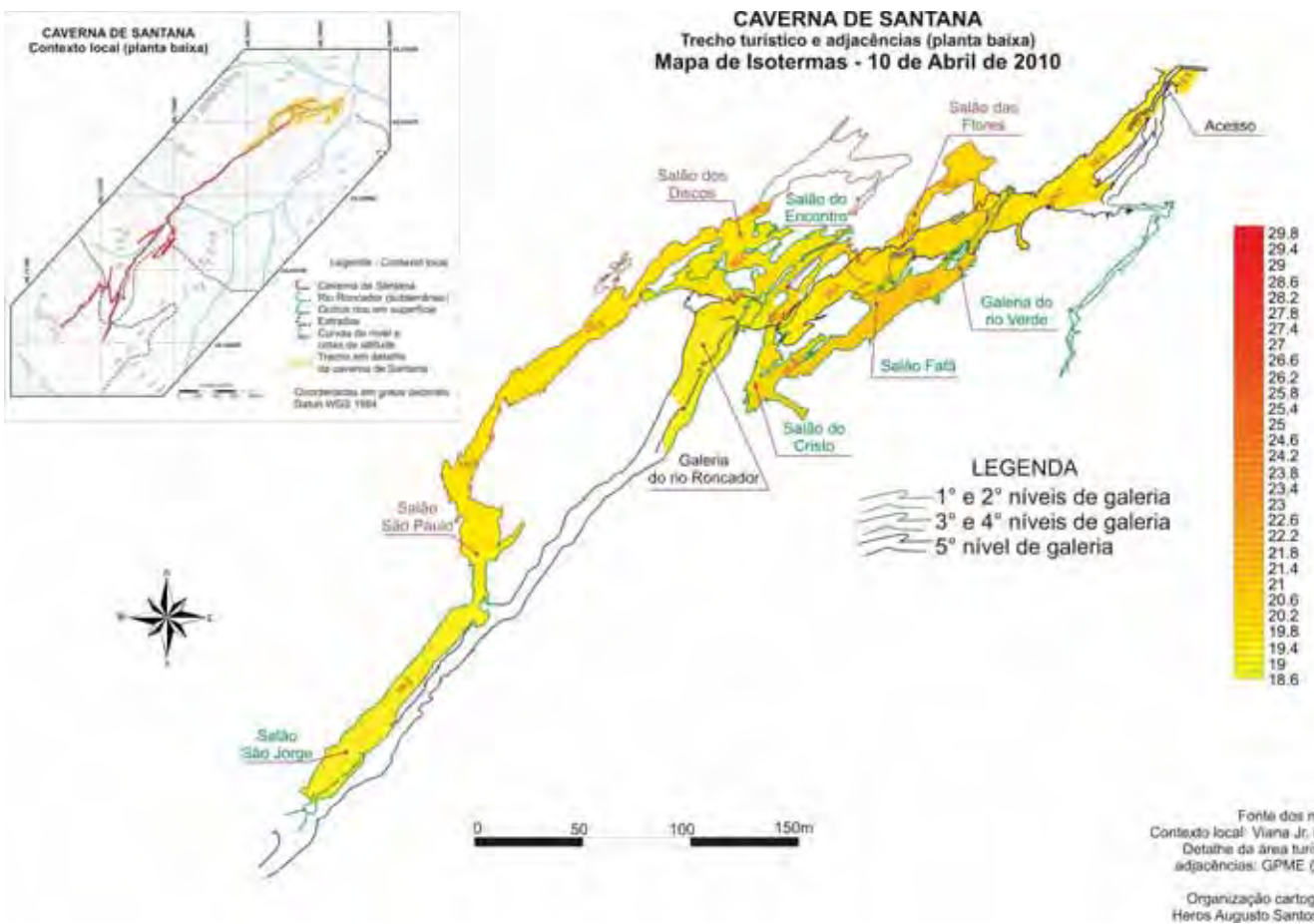


Figura 7.101 – Superfície de tendência de segunda ordem de isothermas (10 de abril de 2010), no trecho turístico e adjacências na caverna de Santana



Figura 7.102 – Superfície de tendência de segunda ordem de isothermas (1º de janeiro de 2011), no trecho turístico e adjacências na caverna de Santana

As figuras ilustram grandes diferenças entre os dois perfis, os quais precisam ser contextualizados, no espaço e, principalmente, no tempo. O intervalo médio de 8 horas para a coleta dos dados do perfil é um fator limitante para uma compreensão espacial estática das isotermas. Isto porque o tempo decorrido entre o início e o fim da realização de cada perfil é suficiente para que alterações atmosféricas tenham decorrido, modificando a condição aferida dos pontos do início da coleta. Trata-se, portanto, de uma limitação metodológica inerente ao processo desenvolvido.

A contextualização dos dados também considera a diferença de estações do ano em que foram registrados. Enquanto o perfil da Figura 7.101 foi feito no mês de abril, outono, uma estação normalmente mais fria, o da Figura 7.102 foi feito em janeiro, no auge do verão. Desta forma, é de se esperar resultados totalmente distintos, como um padrão geral de temperaturas mais amenas no perfil de abril e de valores relativamente maiores no perfil de janeiro.

Embora registrados em épocas diferentes, os dados apresentam algumas semelhanças do ponto de vista qualitativo. Em ambos os perfis, os registros nas galerias superiores são de temperaturas mais elevadas que a galeria do rio, evidenciando uma tendência já observada no monitoramento anual e trimestral, de captura do ar quente. Esta situação fica ainda mais evidente nos salões Flores, Rio Verde e, em grau um pouco menor, na região dos salões São Paulo e São Jorge.

Outro aspecto registrado é que o gradiente térmico externo não se propaga muito além das primeiras dezenas de metros da galeira do rio, o que é mais nítido no perfil da Figura 7.102, no verão. No perfil de outono (Figura 7.101) esta discrepância térmica é menor, o que também se explica pelo fato de que os registros na galeria do rio e na parte externa foram feitos já à noite, após as 19h, quando as temperaturas gerais são mais amenas.

Se as superfícies de tendências das Figuras 7.101 e 7.102 permitem uma primeira visualização de distintos padrões térmicos em função da época do ano, esta diferenciação fica ainda mais evidente por meio da estatística descritiva dos dados por trechos da caverna de Santana (Figura 7.103).

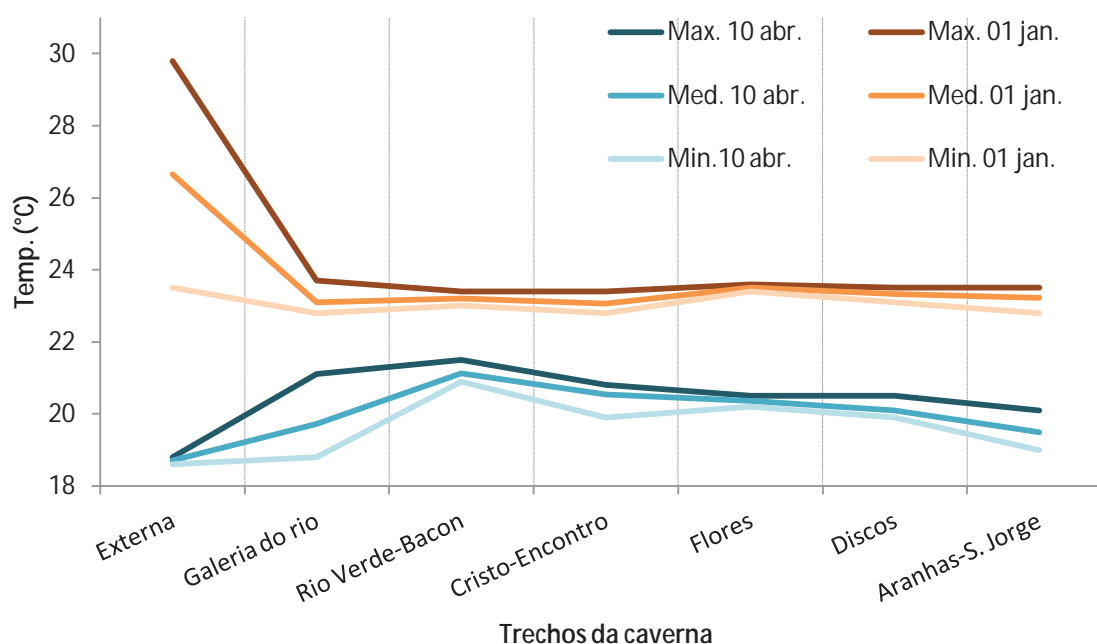


Figura 7.103 – Máximas, médias e mínimas do perfil térmico por trechos da caverna de Santana

As temperaturas registradas no perfil de 10 de abril de 2010 foram menores que as do dia 1º de janeiro de 2011, mesmo nas máximas registradas. As diferenças são observadas em todos os trechos da caverna e na área externa. Três trechos em particular chamam a atenção na Figura 7.103.

Na área externa, as diferenças registradas nas máximas dos dois perfis ocorrem principalmente em função do horário em que foram feitas: durante a noite em 10 de abril e no meio da tarde em 1º de janeiro. Esta condição explica a amplitude térmica maior do segundo perfil, de 6,3 °C em oposição aos 0,2 °C do primeiro. Durante o dia, a maior temperatura do ambiente externo diminui gradativamente em direção ao interior da caverna, o que se percebe no perfil atmosférico. A temperatura maior (29,8 °C) foi aferida no ponto externo mais distante da boca da caverna, enquanto a mínima (23,5 °C) foi quase em sua entrada.

Na galeria do rio Roncador, houve maior amplitude térmica em 10 de abril (2,3 °C) do que em 1º de janeiro (0,9 °C). Neste caso, a variação é atribuída à dinâmica atmosférica diferenciada nas distintas épocas do ano. Os valores mais elevados do perfil de outono (21,1 °C) são de pontos mais superiores na galeria, como no Cavalo e na escada que sobre para o salão Fafá (espeleotema Peru). Estes pontos mais elevados estão mais sujeitos a uma influência maior das camadas superiores de ar mais quente dentro da caverna, sobretudo em dias mais frios. No perfil de verão esta

diferença não se evidencia, pois toda a atmosfera estava mais aquecida, com a máxima no trecho chegando a 23,7 °C (influência direta do meio externo, sendo esta temperatura registrada próxima a ressurgência) e com 23,2 °C no espeleotema Peru – 2,1 °C a mais do que o registrado no mesmo ponto no mês de abril.

Por fim, o setor Aranhas – São Jorge, que inclui o salão São Paulo. Enquanto no perfil de outono sua temperatura foi relativamente mais baixa que as demais galerias da caverna – tanto nas máximas quanto na média –, no perfil de verão sua temperatura foi mais próxima das demais galerias. No entanto, as variações são bastante sutis, tornando a realização de apenas dois perfis insuficiente para uma explicação mais conclusiva sobre os motivos destas diferenças.

Outro parâmetro aferido nos perfis foi a pressão atmosférica (Figura 7.104).

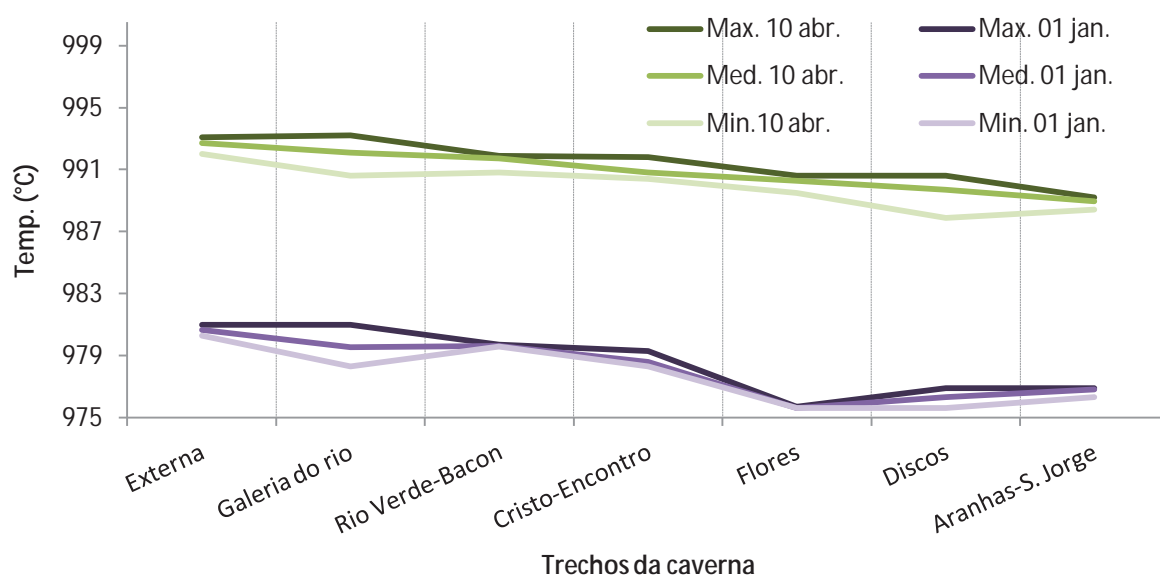


Figura 7.104 – Máximas, médias e mínimas do perfil isobárico por trechos da caverna de Santana

Embora as faixas de variação entre os perfis sejam diferentes entre si em aproximadamente 12 – 15 hPa, seus padrões de variabilidade são semelhantes. Tal fato é digno de nota, dado que os perfis foram feitos não somente em épocas distintas do ano, mas em diferentes horários do dia.

Ainda assim, as variações por trechos da caverna registradas na Figura 7.104 demonstram um padrão geral, com a pressão sendo mais elevada no ambiente externo e mais baixa à medida que se avança ao interior da caverna, com uma diferença de aproximadamente 4 hPa. A título de exemplo, a Figura 7.105 traz uma carta de pressão atmosférica feita por triangulação, do perfil de outono (abril/2010).

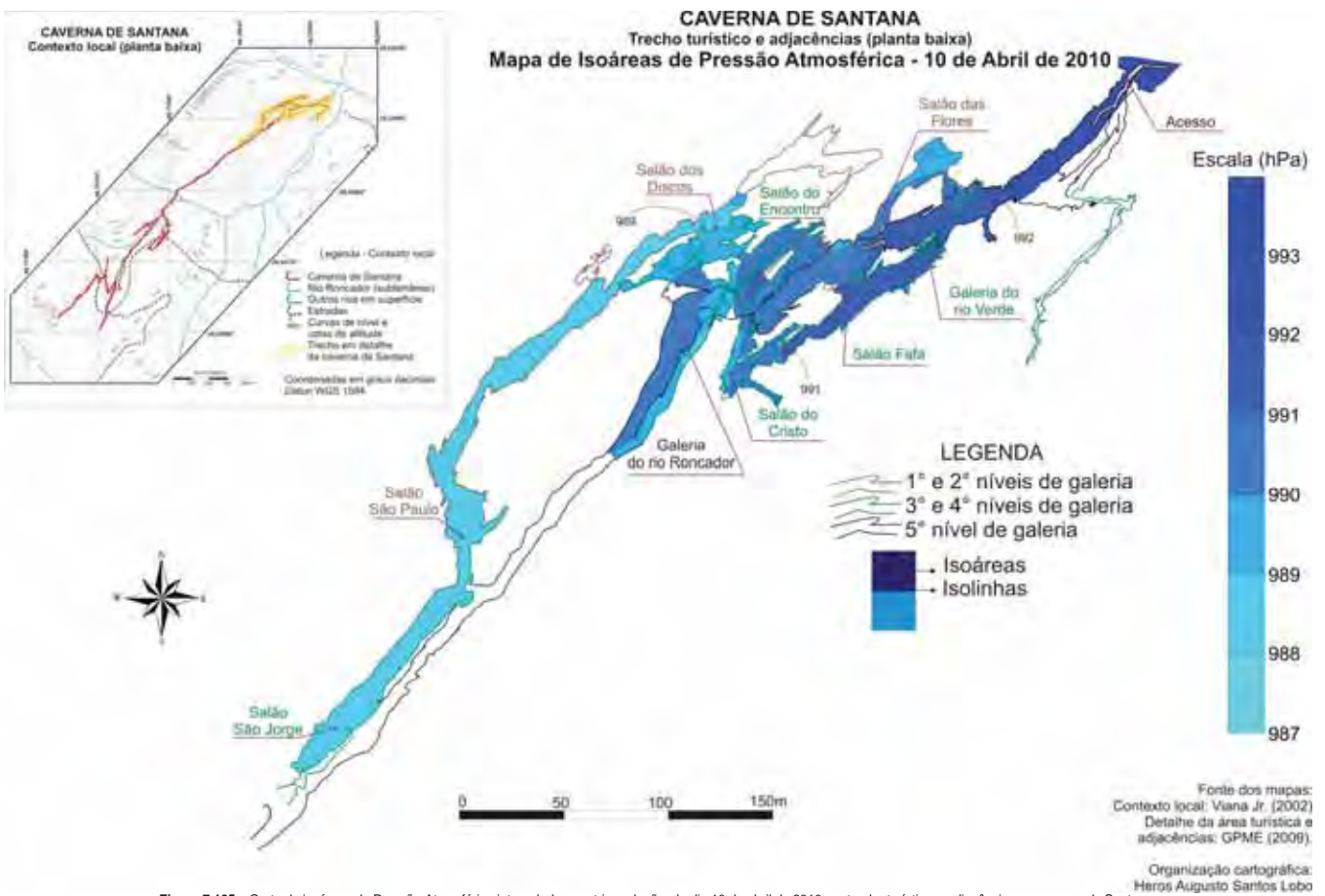


Figura 7.105 – Carta de isoáreas de Pressão Atmosférica interpoladas por triangulação, do dia 10 de abril de 2010, no trecho turístico e adjacências na caverna de Santana

A pressão atmosférica apresentou pequena variação no perfil feito em abril/2010, com mínima de 987,4 hPa no acesso ao salão dos Vulcões e máxima de 992,7 hPa na galeria do rio, próxima ao acesso ao salão do Cavalo. Particularmente, em relação à máxima, a sua relação com os pontos periféricos na interpolação apresentou detalhamento demasiado nas isoáreas geradas por triangulação (Figura 7.105). Além disso, a triangulação apresenta excesso de isoáreas na galeria do rio em posição paralela ao conduto, o que foge à probabilidade de uma situação real.

Também é preciso acrescentar que a pressão atmosférica possui uma variação cíclica, o que foi observado nos dados apresentados nas Figuras 7.95, 7.96, 7.99 e 7.100. Apesar das séries serem curtas, com no máximo 6 dias, foram feitas análises de densidade espectral em duas delas (Figura 7.106).

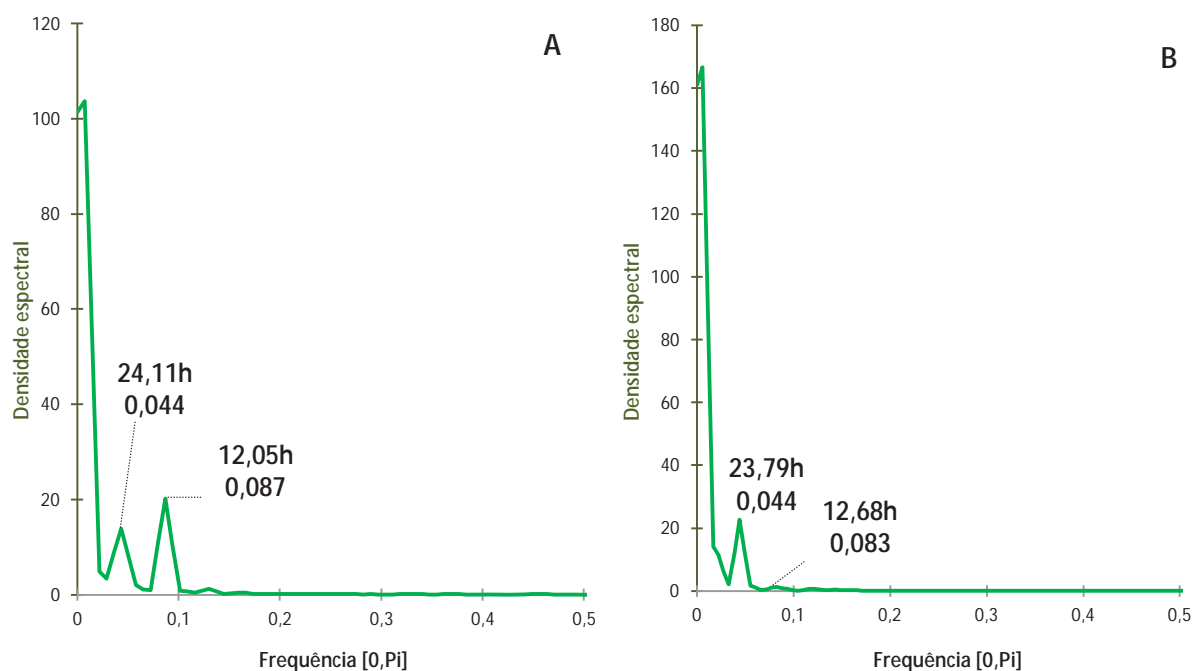


Figura 7.106 – Densidade espectral das séries de pressão atmosférica dos dias 17 à 23 de janeiro de 2010 (A) e 9 à 13 de fevereiro de 2010 (B)

Conforme observado nas Figuras 7.95 a 7.100, a variação da pressão atmosférica aparenta possuir uma componente diuturna de variação, o que é corroborado nas análises de densidade espectral da Figura 7.106. Em ambas as séries, picos de maior densidade com ciclos de aproximadamente 24h e 12h são registrados, bem como a existência de picos de maior densidade, evidenciando a existência de fenômenos cíclicos de maior amplitude na série. Sobre a ciclicidade diuturna, a Figura 7.107 apresenta um padrão identificado na série coletada no mês de fevereiro de 2010.

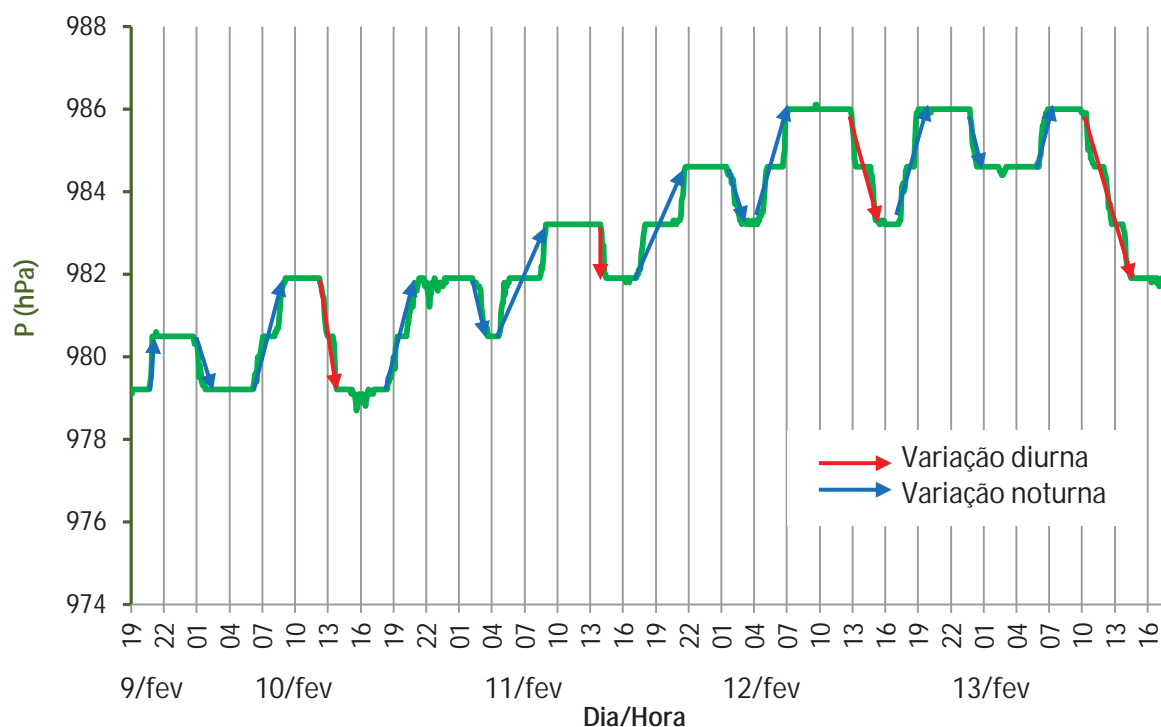


Figura 7.107 – Padrão de variação da pressão atmosférica da série de fevereiro/2010

Os acréscimos na pressão atmosférica ocorrem predominantemente à noite, período em que a temperatura externa diminui. Em alguns casos, ocorrem também diminuições de até 1 hPa à noite. Todavia, a maioria das quedas de pressão atmosférica ocorrem durante o dia, quando a temperatura externa é maior, chegando a um gradiente barométrico de até 5 hPa.

É preciso cautela ao assumir este padrão para um ciclo temporal mais amplo, dado que a descontinuidade temporal da série impede que afirmações mais categóricas sejam feitas acerca da dinâmica de variação barométrica, deixando esta lacuna para ser preenchida por estudos futuros na caverna de Santana.

Por fim, uma análise da correlação entre a variabilidade da pressão atmosférica e da temperatura do ar é feita no capítulo 8, durante a discussão.

Para o CO₂ foram realizados dois perfis espaço-temporal, nos meses de abril/2010 e janeiro/2011. Os resultados, tratados com o uso de algoritmos de interpolação de dados, são apresentados nas Figuras 7.108 e 7.109.

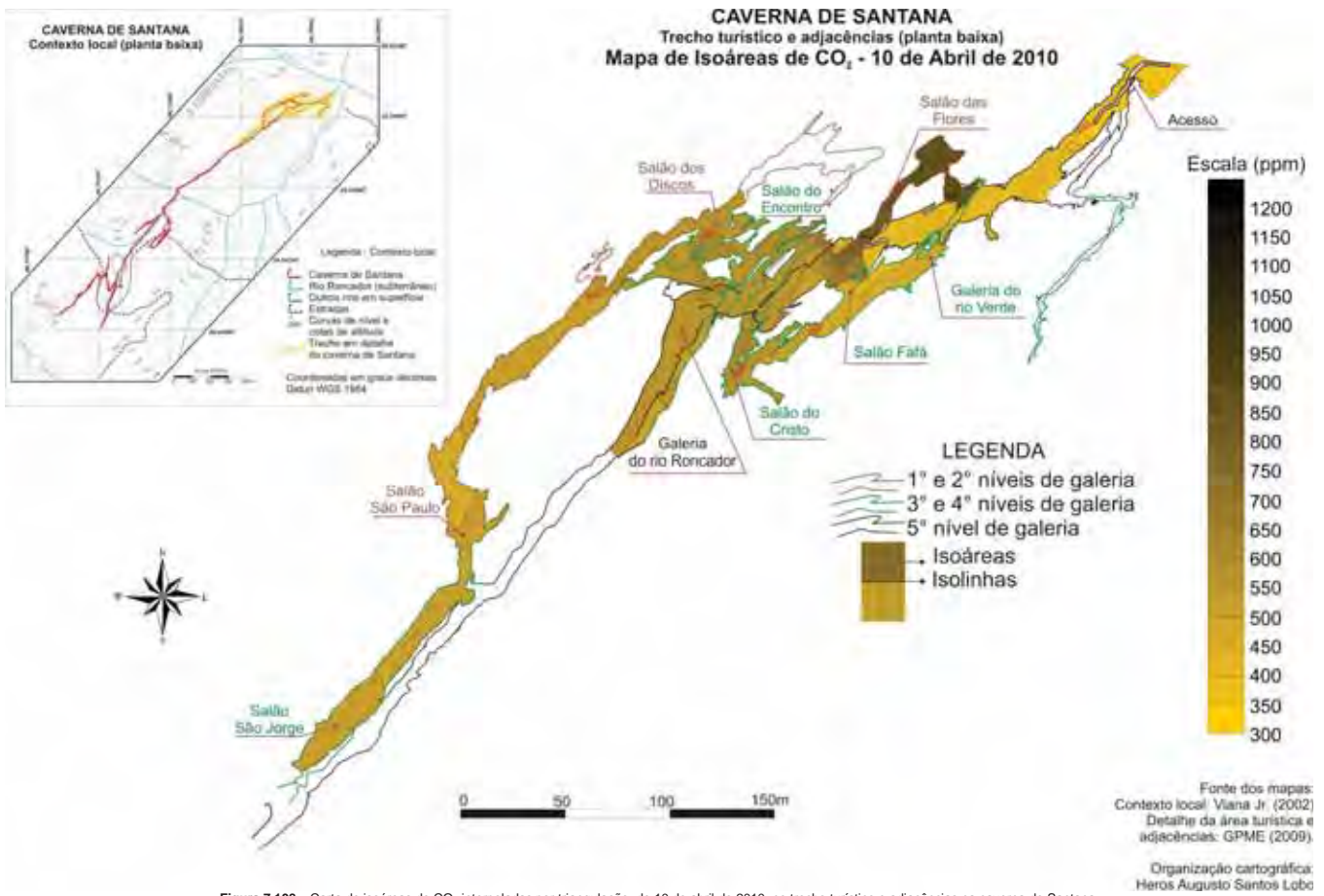


Figura 7.108 – Carta de isoáreas de CO₂ interpoladas por triangulação, de 10 de abril de 2010, no trecho turístico e adjacências na caverna de Santana

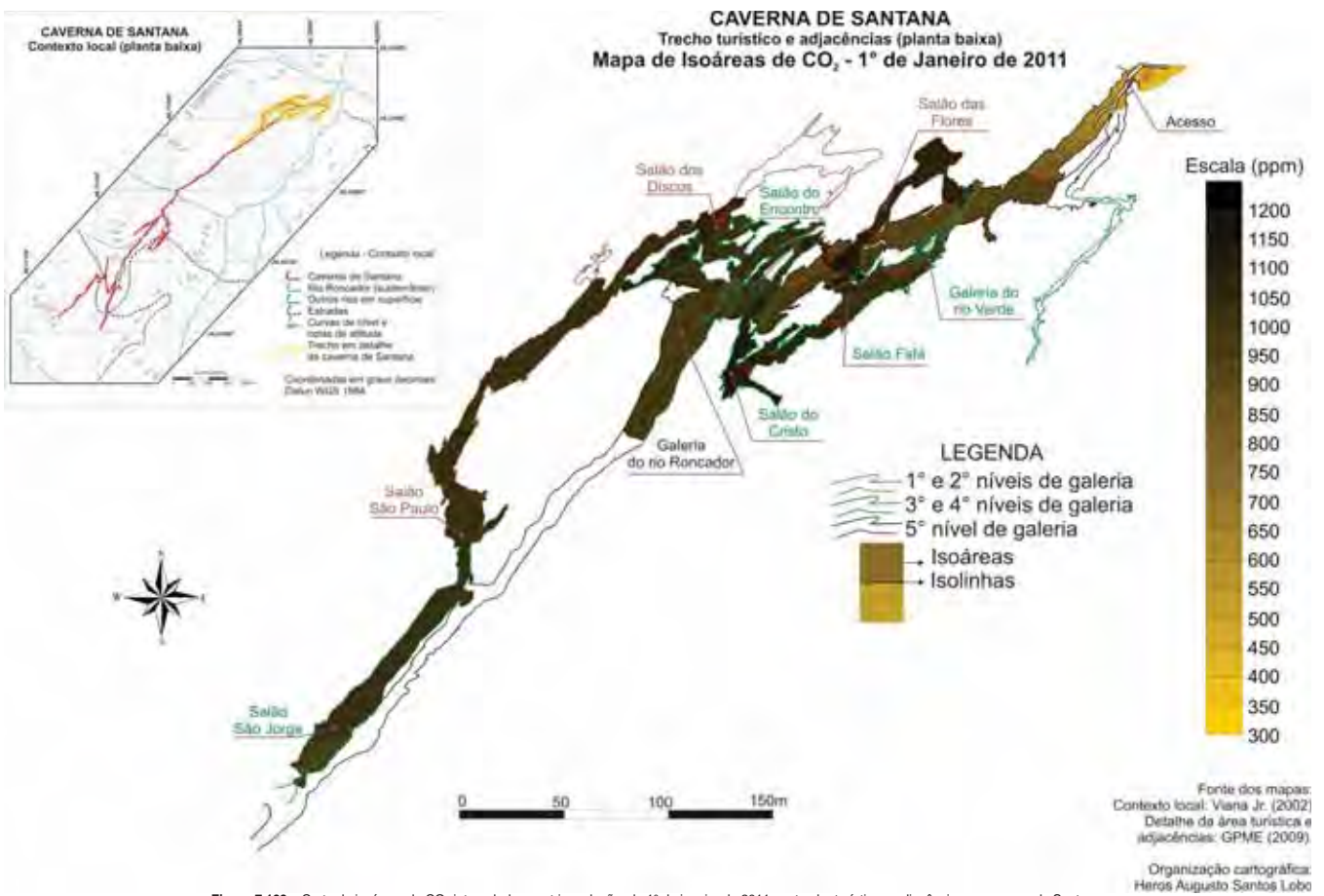


Figura 7.109 – Carta de isoáreas de CO₂ interpoladas por triangulação, de 1º de janeiro de 2011, no trecho turístico e adjacências na caverna de Santana

O CO₂ apresentou um padrão qualitativo muito semelhante em ambos os perfis, com a concentração se elevando mais nas galerias superiores e trechos mais confinados da caverna. Este padrão comum é visualizado de forma mais nítida na Figura 7.110.

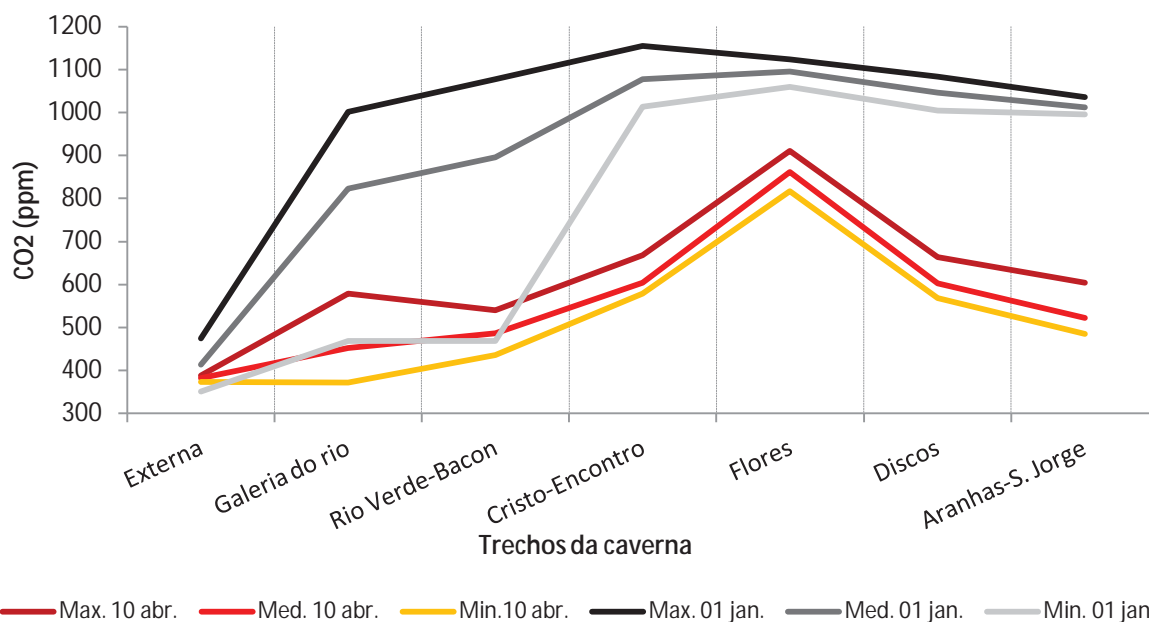


Figura 7.110 – Máximas, médias e mínimas do perfil de CO₂ por trechos da caverna de Santana

Os valores mais elevados são encontrados nos salões Cristo, Encontro, Flores e Discos. No perfil de outono (Figura 7.108), a concentração do salão das Flores foi acima dos demais salões, com média de 861,6 ppm – contra uma média geral do restante da caverna de 533,4 ppm – e máxima de 910 ppm.

No perfil de verão (Figura 7.109), a concentração geral de CO₂ foi maior do que no outono. Enquanto no outono a média geral no interior da caverna foi de 588,1 ppm, no verão este valor atingiu 991,5 ppm. Na área externa a diferença não foi tão evidente, como média de 383 ppm no outono e 413 ppm no verão. A maior concentração média foi no salão das Flores, de 1095,7 ppm, seguida pelos trechos Cristo-Encontro (1077,6 ppm), Discos (1045,5 ppm) e Aranhas-São Jorge (1011,7 ppm). Entretanto, o maior valor absoluto foi registrado no salão do Cristo, com 1154 ppm. Deve-se ressaltar que este registro foi obtido durante o horário de visitação, com a presença de um grupo de nove visitantes no salão no momento da coleta. Nos salões Flores e Discos, as máximas registradas foram de, respectivamente, 1124 ppm e 1083 ppm – neste caso, sem a presença de visitantes.

7.7. Fluxos de ar e condensação de água na caverna de Santana

A identificação dos fluxos de ar no ambiente, em conjunto com o monitoramento espeleoclimático, permite a obtenção ou mesmo a confirmação de hipóteses sobre os padrões pretéritos e atuais da movimentação de energia e massa na atmosfera cavernícola. Com isso, podem ser interpretados aspectos básicos de processos de acúmulo e dispersão gasosa, bem como mecanismos de intemperismo subterrâneo em atividade, tal como a corrosão por condensação.

Nos trabalhos de campo, diversos pontos foram observados com o intuito de identificar indícios dos fluxos atmosféricos mais significativos na caverna de Santana. Todos foram fotografados e tiveram sua localização determinada no mapa da caverna, de forma a sistematizar os dados aferidos e inferidos. Especial atenção foi dada para a aferição da velocidade do vento, condensação de água a partir da saturação hídrica e espeleotemas originados pela diferença de saturação hídrica do ar, como os coralóides.

A aferição da velocidade e direção do vento passou por severas limitações na pesquisa. A disponibilidade de apenas anemômetros de conchas foi o principal motivo, dada sua restrita capacidade de captar fluxos de ar de pequena magnitude. Na caverna de Santana, estes fluxos mensuráveis foram registrados somente nos metros iniciais da galeria do rio, onde em algumas épocas do ano, em determinadas horas do dia, a movimentação gasosa é perceptível. Para complementar esta aferição pontual, foram feitos testes com palitos de fósforo umedecidos, para a produção de fumaça, em procedimento semelhante ao realizado por Fernández-Cortés et al. (2006b). Os resultados das aferições por anemômetro e inferências por fumaça são ilustrados na Figura 7.111.



Figura 7.111 – Direção dos fluxos de ar aferidos e inferidos na caverna de Santana

Para melhor clareza na análise dos fluxos de ar, os resultados foram divididos em cinco zonas distintas: galeria do Rio (1), Fafá-Cristo (2), Fogueira-Cristo (3), Encontro (4) e Bailarina (5), nas quais foram indicados os pontos de coleta dos dados (Figura 7.111).

Na zona 1, os fluxos aferidos foram de 0,2 m/s (1a), às 10h 03min do dia 18/06/2009, e de 0,1 m/s (1b), às 18:43h do dia 4/07/2009. Ambas apresentam fluxo cumulativo em direção ao interior da caverna. Nestas datas, o monitoramento espeleoclimático apresentou as condições ilustradas na Figura 7.112.

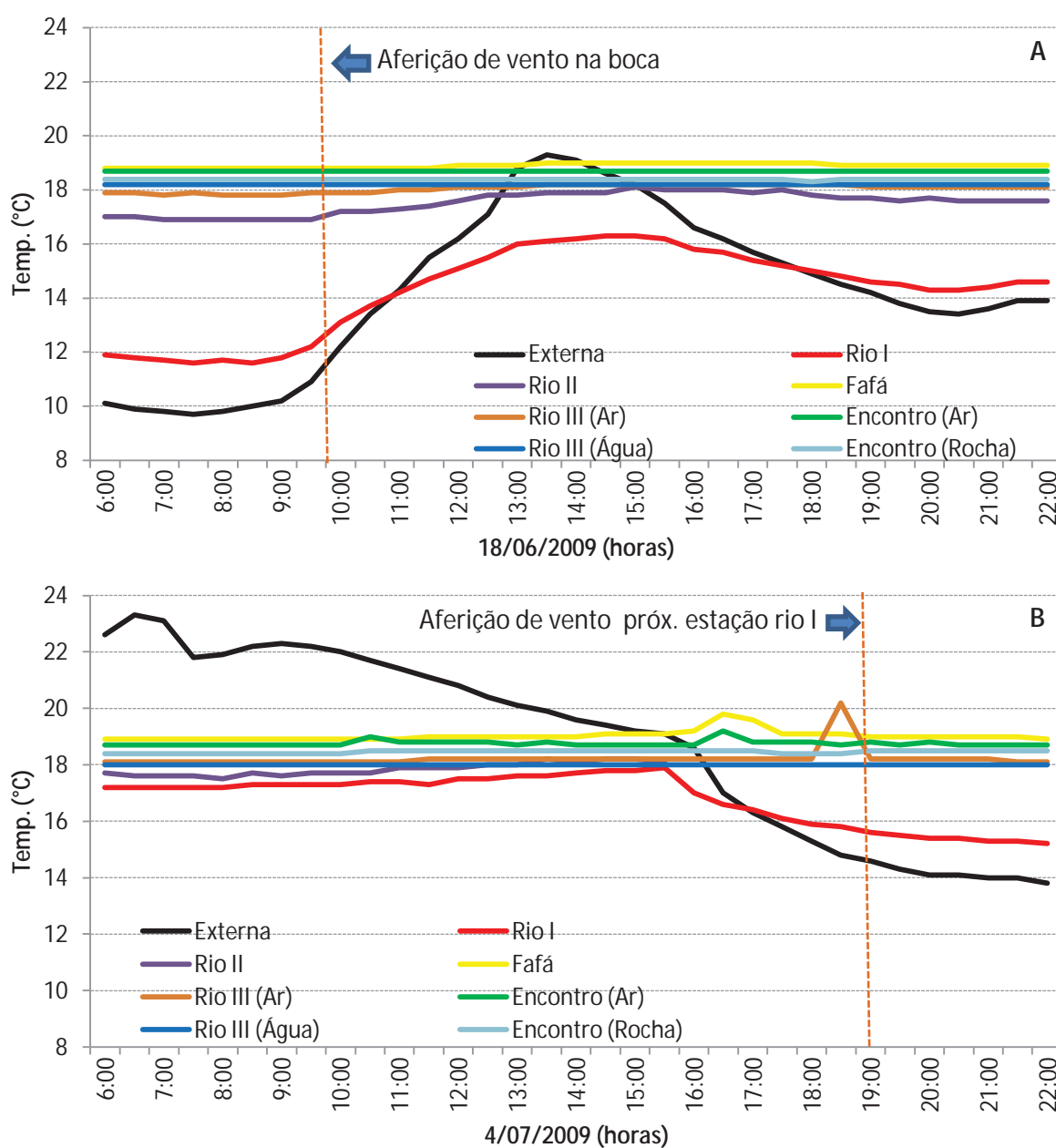


Figura 7.112 – Monitoramento da temperatura do ar, entre 6h e 22h, nos dias 18/06/2009 (A) e 4/07/2009 (B)

Em ambos os casos, a temperatura exterior era inferior à interior, dada que as aferições foram feitas no inverno. Em ambos os momentos, o gráfico ilustra que em alguns horários do dia a situação se inverteu, com a temperatura exterior suplantando a interior, o que teoricamente inverte a direção do fluxo de ar.

As inferências representadas em 1c, 1d e 1e (Figura 7.111), bem como nas demais áreas da caverna, foram feitas no dia 22/01/2010, a partir das 19h. Neste caso, o fluxo apresentado é dispersivo em relação ao meio externo. Os dados apresentados na Figura 7.113 corroboram esta interpretação.

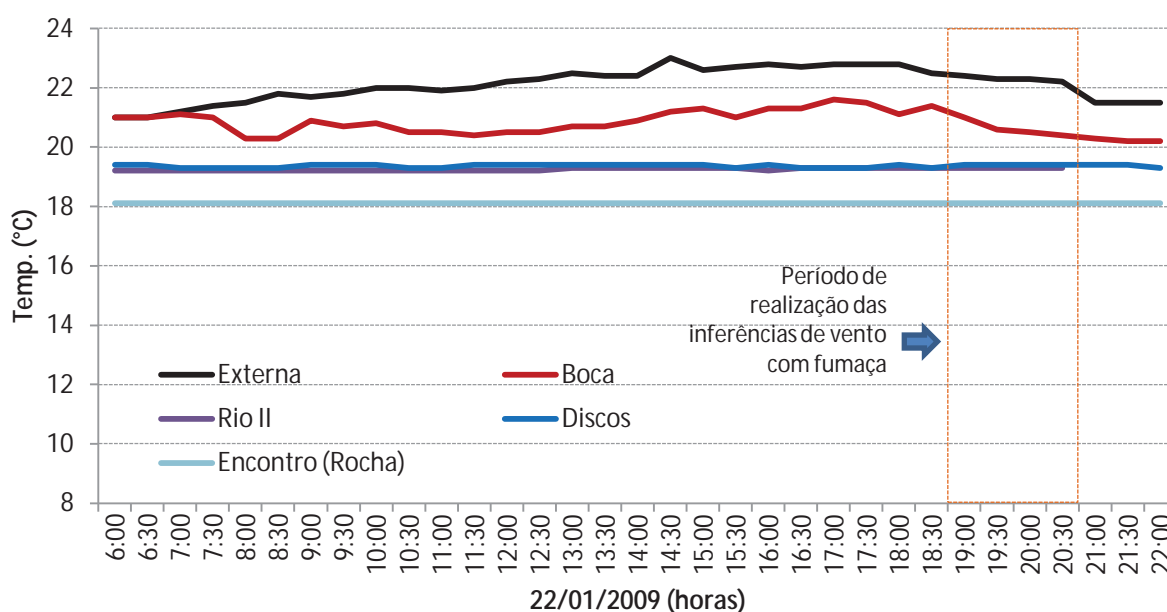


Figura 7.113 – Monitoramento da temperatura do ar, entre as 6h e as 22h, no dia 22/01/2010

Como se observa na Figura 7.113, a temperatura fora da caverna estava maior que em seu interior, impelindo com isso a movimentação gasosa de dentro para fora, resultando nos vetores de fluxo inferidos.

A existência desta dinâmica de troca de ar em ambas as direções, especialmente na zona 1 já era esperada, dado se tratar da área de contato entre a atmosfera interna e a externa.

Na zona 2 da Figura 7.111, todos os vetores de fluxo de ar se direcionam no sentido Cristo–Fafá. No salão Fafá (2d), os vetores se dividem para duas direções: a noroeste, em ponto que provavelmente a galeria se comunica com a galeria do rio; a nor-nordeste, em direção ao restrito corredor que, no circuito turístico, liga a galeria do rio com as galerias superiores.

Na zona 3, os vetores de fluxo de ar se direcionam no sentido galeria do Fogo (3a) – Cristo, gerando uma situação de acúmulo térmico no salão do Cristo, a qual foi também detectada nos monitoramentos anual e trimestral. Isto ocorre porque o salão em questão se localiza em patamar superior em relação ao quarto nível de galerias superiores, em um provável resquício do terceiro nível superior de galerias. Em dias de maior saturação hídrica, este fluxo torna-se visível à olho nú, por meio de pequenas gotículas de água, refletidas contra a luz das lanternas.

A zona 4 é o salão do Encontro, que recebe fluxo da zona 5, o qual se dispersa em três direções: sentido galerias superiores (4a), sentido Cristo (4b) e sentido salão das Flores (4c). Por fim, a zona 5, que recebe o ar da galeria do Rio em fluxo ascendente por meio dos pontos 5a e 5c, o qual se direciona no sentido do salão dos Discos no ponto 5b e no sentido do salão do Encontro no ponto 5d.

Além do vento, outros indicadores do meio físico também permitem a inferência de circulação atmosférica, como a formação de condensação no choque térmico entre massas de ar e com a rocha e a existência de espeleotemas formados pela corrosão originada por meio do próprio ar, como alguns tipos de coralóides. A Figura 7.114 apresenta a localização de feições destes tipos mencionados na caverna de Santana e, na sequência, a Figura 7.115 traz fotos destes locais.



Figura 7.114 – Localização das feições indicativas de fluxo de ar na caverna de Santana



Figura 7.115 – Fotos das feições indicativas de fluxo de ar na caverna de Santana

Dois pontos de condensação relacionados aos choques térmicos em massas de ar ou destas com as rochas (Figuras 7.114 e 7.115a, g) foram identificados na caverna de Santana, muito embora em escalas mais detalhadas de aferição, este fenômeno deva ocorrer em quase toda a cavidade. A Figura 7.115a corresponde à galeria do rio, em trecho a uma distância de 70 m da boca da caverna. Trata-se de uma área de intensa troca gasosa, com choques de temperatura que levam à condensação da água que está saturada no ar.

Nos demais pontos amostrados foram encontrados espeleotemas como coralóides, crostas de dissolução e helictites, todos orientados em direções preferenciais (demonstrada na Figura 7.114) em função da dissolução da rocha gerada pelo fluxo de ar relativamente mais seco, tal como descrito por Palmer (2007) e Quenn (2009). São espeleotemas e espeleogens de calcita, gerados a partir da dissolução de outros espeleotemas ou da rocha matriz.

7.8. Impactos ambientais do turismo

A identificação dos impactos ambientais do turismo está entre os principais objetos de investigação da presente pesquisa. A visitação turística deve ser realizada em bases ambientalmente sustentáveis, permitindo a conservação dos recursos naturais concomitante ao seu uso. No entanto, sabe-se de antemão que é impossível a existência de uso antrópico de um meio natural – especialmente no caso das cavernas, cuja dinâmica de fluxo de energia e massa é relativamente menor que no meio externo – sem a existência de nenhum tipo de alteração, seja ela intermitente e reversível (impacto), seja permanente (dano).

Na presente análise, os impactos foram divididos em dois grupos. No primeiro, foram identificadas as alterações no meio físico, incluindo aquelas impostas ao ambiente subterrâneo, de forma direta ou indireta, nas rochas, espeleotemas e corpos d'água, como a adaptação dos acessos a galerias e salões para as necessidades dos turistas; e as conseqüentes da visitação, como pisoteamento, manutenção de infra-estruturas e deposição de fuligem, corpos estranhos e material biológico, de origem diversa nos espeleotemas. O segundo grupo apresenta os impactos gerados durante o processo de visitação na atmosfera cavernícola, considerando os parâmetros estudados e apresentados nas seções anteriores.

7.8.1. Impactos e danos nas rochas e espeleotemas

Os primeiros impactos do turismo na caverna de Santana podem ser observados desde a sua entrada (Figura 7.116).

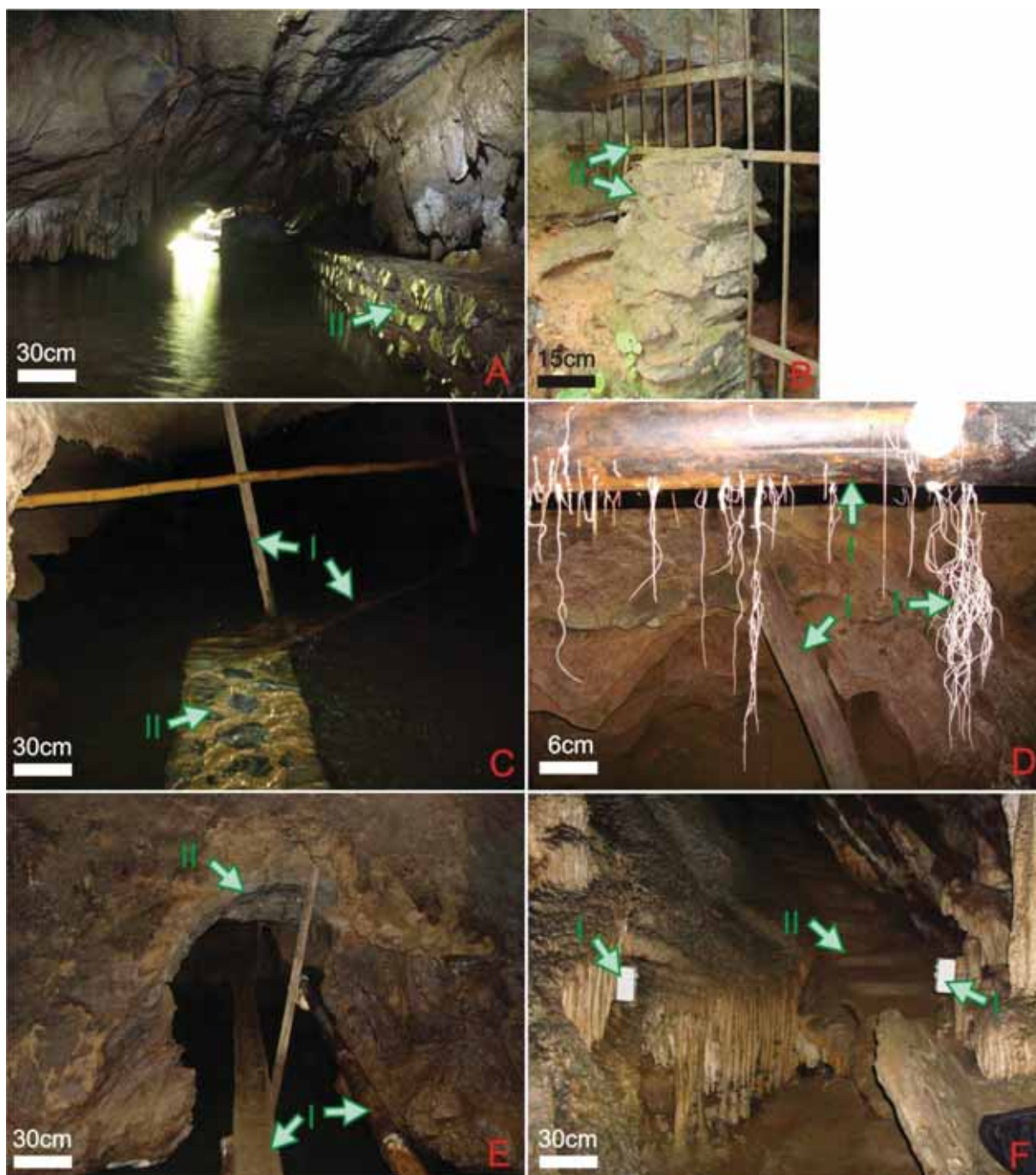


Figura 7.116 – Impactos (I) e danos (II) da implantação de infra-estrutura de acesso na caverna de Santana: A – passarelas de blocos de rocha e argamassa; B – portão de entrada; C – passarelas de blocos de rocha e argamassa, pontes e corrimãos em madeira; D – corrimão em madeira e fungos; E – desobstrução de galeria, pontes e corrimãos de madeira; F – escadas de blocos de rocha e argamassa e instrumentos de aferição de dados ambientais.

Para acesso à caverna, a sua entrada foi ampliada, com uso de britadeiras e explosivos, em 1930-1932, e instalação de passarelas e pontes com uso de troncos de árvores, o que por fim, possibilitou a ampla visitação turística da caverna posteriormente.

Posteriormente, foram construídas passarelas com uso de argamassa, com cimento, e rochas, com a canalização parcial do rio em trechos determinados (Figura 7.116A, C), pontes, corrimãos e escadas em madeira (7.116C, E), além de cortes na rocha dentro da caverna, alargando algumas passagens para facilitar a visitação (7.116E). A substituição das antigas passarelas e pontes de madeira, por passarelas de argamassa, veio no sentido de torná-las permanentes, uma vez que as de madeira exigiam substituições periódicas e, também por serem locais propícios para a excessiva proliferação de fungos, especialmente nos períodos de chuva – o que ainda se observa nas estruturas de corrimãos (7.116D) e escadas.

Nos anos de 1980, a caverna recebeu um portão em sua entrada (7.116B), para conter a visitação irregular dos campistas que pernoitavam no Núcleo Santana. Com a melhoria do controle do acesso e o fechamento do *camping*, o portão foi retirado em 2008. Outra prática comum na Santana é o uso de blocos rochosos, rejuntados com argamassa, para correções de piso e construção de escadas (7.116F). Por fim, não podem ser esquecidos os impactos gerados por pesquisas técnico-científicas, com a instalação de instrumentos, amarração de fitas e marcações de bases (7.116F). Os instrumentos desta foto são desta pesquisa, e já foram retirados. Todavia, podem ser vistos no rio Roncador e em diversas galerias os restos de pesquisas anteriores realizadas na caverna, que até o presente não foram retirados.

Além destes, os impactos consequentes às práticas de visitação também podem ser observados na Santana (Figura 7.117).



Figura 7.117 – Impactos gerados pelas práticas de uso antrópico na caverna de Santana: A – lama carregada para a galeria superior; B – desgaste da borda de travertinos no chão; C – quebra de um pedaço de travertino; D – pixações; E – grafismos; F – queimaduras de carbureteira; G – fuligem depositada pela queima do acetileno nas carbureteiras; H) Pregos e I) madeira, restos de manutenção das infra-estruturas de acesso no interior da caverna.

Um dos primeiros impactos da visitação na caverna de Santana é passível de observação já no seu acesso inicial. Por mais que se possa tomar cuidado e até exigir a limpeza dos pés, os visitantes acabam por transportar detritos na sola dos calçados, tanto para a galeria do rio como também para as galerias superiores (Figura 7.117A). A locomoção dos visitantes gera também desgastes na rocha e nos espeleotemas localizados no chão, como em bordas de travertinos (7.117B), estalagmites, escorrimentos e outros. Mesmo os espeleotemas fora do trajeto de caminhamento por vezes são danificados, como o travertino da Figura 7.117C.

O limite entre uma inscrição que pode ser considerada histórica (7.117D), realizada durante a expedição Tatus¹² em 1975 e uma atual (7.117E) é tênue sob a

¹² Experimento realizado em 1975 por alunos do Centro Excursionista Universitário (CEU/USP). os participantes permaneceram por 15 dias contínuos acampados dentro da caverna, na região do salão São Paulo (local da foto 83D), sem contato direto com o meio externo ou outras pessoas. Seus objetivos foram: explorar e topografar a caverna; e verificar as reações comportamentais do ser humano na ausência de fotoperíodos e de quaisquer instrumentos capazes de marcar o tempo.

ótica geoconservacionista, pois em ambos os casos, existe impacto no meio físico. Outro vetor de impactos analisado é o uso das carbureteiras como fonte de luz. Mesmo em salões mais restritos, como o das Flores, é possível verificar as marcas deixadas pelo descuido dos visitantes – tanto turistas, em tempos pretéritos, quanto pesquisadores e espeleólogos na contemporaneidade – nos trechos iniciais de teto baixo (7.117F), próximos à entrada. No mesmo salão, foi identificado o despejo de restos de carbureto (7.117G), uma prática que, embora não recomendada, era por vezes feita por frequentadores de cavernas. Neste caso específico, a deposição de carbureto gerou um fato curioso, os *carbidemites*, formas correlatas aos espeleotemas e compostas por Calcita (CaCO_3), já descritas em cavernas dos Estados Unidos, Venezuela, México e Nova Zelândia (HILL; FORTI, 1997).

Também foram observados impactos decorrentes da manutenção das benfeitorias de acesso dentro da caverna, como pregos velhos e oxidados deixados sobre blocos de rochas perto das escadas (7.117H) e até mesmo madeira de reposição, para manutenção dos corrimãos (7.117I).

A identificação e análise de impactos e danos nas rochas e espeleotemas também foi feita em escalas mais ínfimas, além da percepção visual, por meio de lupa petrográfica e microscópio eletrônico de varredura. Para tanto, foram selecionados pontos de contraste na caverna de Santana, os quais são exemplificados na Figura 7.118. A relação completa de pontos de coleta das amostras de espeleotemas foi apresentada anteriormente, no capítulo dos materiais e métodos da pesquisa, na Figura 6.9.



Figura 7.118 – Diferenças entre os tipos de ambientes selecionados para a coleta de amostras de espeleotemas: A) ambiente com fuligem preta, oleosa, que se solta ao toque; B) ambiente sem fuligem, com espeleotemas sem contaminação aparente de corpos estranhos.

Primeiramente, são apresentadas as micrografias e eletromicrografias resultantes das análises de amostras presumidamente contaminadas. Os diversos tipos e níveis de alteração de suas superfícies são ilustrados nas Figuras 7.119 à 7.121. Observa-se elevado intemperismo superficial (7.119A; 7.120A, B), com corrosão da calcita secundária, materiais particulados – provavelmente endógenos e exógenos – depositados (7.121A) e, em alguns casos, já calcificados (7.121B). Também são evidentes as diferenças entre camadas mais antigas de depósitos secundários, sem fuligem negra, e as mais recentes, recobertas de fuligem (7.119A, B, E).

A presença de material particulado é evidente nas eletromicrografias 7.120E e F. Além de placas nanométricas de calcita, nota-se uma fuligem dispersa por toda o trecho amostrado, para o qual levanta-se a hipótese de ser o humo de carbono originado na queima do acetileno. Entretanto, outras hipóteses também devem ser consideradas, como fragmentos de pele, tecido ou mesmo decorrentes de atividade microbiológica. Esta última seria originada, por exemplo, por organismos como os demonstrados nas eletromicrografias 7.121C, D e E, que podem ser fungos, bactérias, cianobactérias ou outros organismos, sendo as formas mais comuns os cocos. As alterações da eletromicrografia 7.121F também suscitam distintas hipóteses, como a corrosão microbiológica, a deposição de calcita induzida por atividade microbiológica ou mesmo alteração térmica em função da proximidade da chama de uma carbureteira – o que seria mais provável e compatível com o local onde a amostra foi coletada, um espeleotema chamuscado, do tipo cortina, no salão do Cristo.

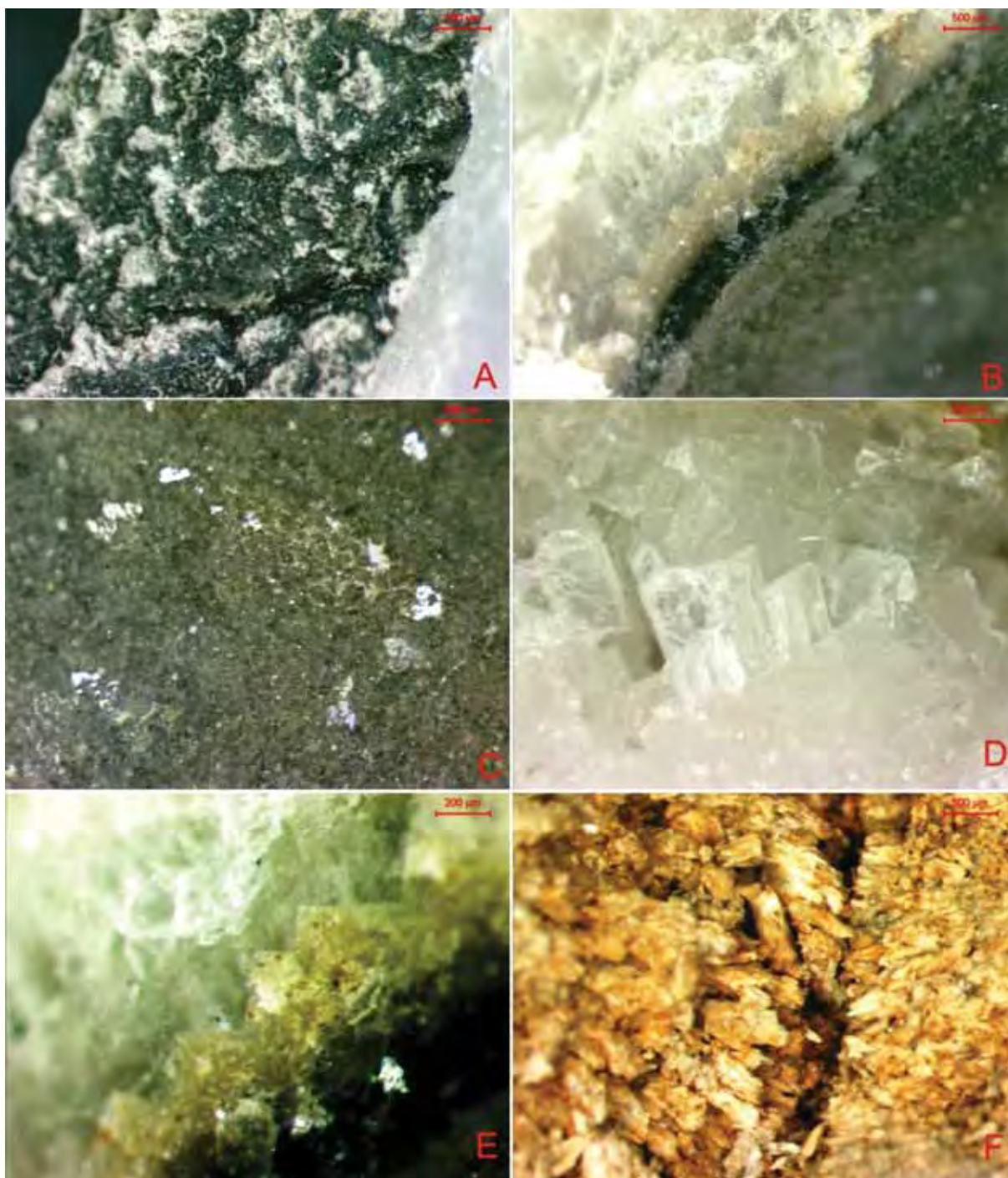


Figura 7.119 – Micrografias de espeleotemas. A) Superfície rugosa e com fuligem; B) Detalhe da lateral, evidenciando a diferença entre as camadas superiores escuras e inferiores brancas; C) Superfície com fuligem em aumento de 20x. Nota-se a reflexão da luz em algumas fácies de cristais de calcita; D) Superfície sem fuligem com aumento de 20x. Notam-se os cristais com os hábitos típicos de calcita; E) Aumento de 50x na lateral, evidenciando uma camada intermediária entre a superfície suja e os cristais branco-translúcidos; F) Aumento de 20x em superfície de amostra de espeleotema avermelhado, que se encontrava sem deposição aparente de fuligem.

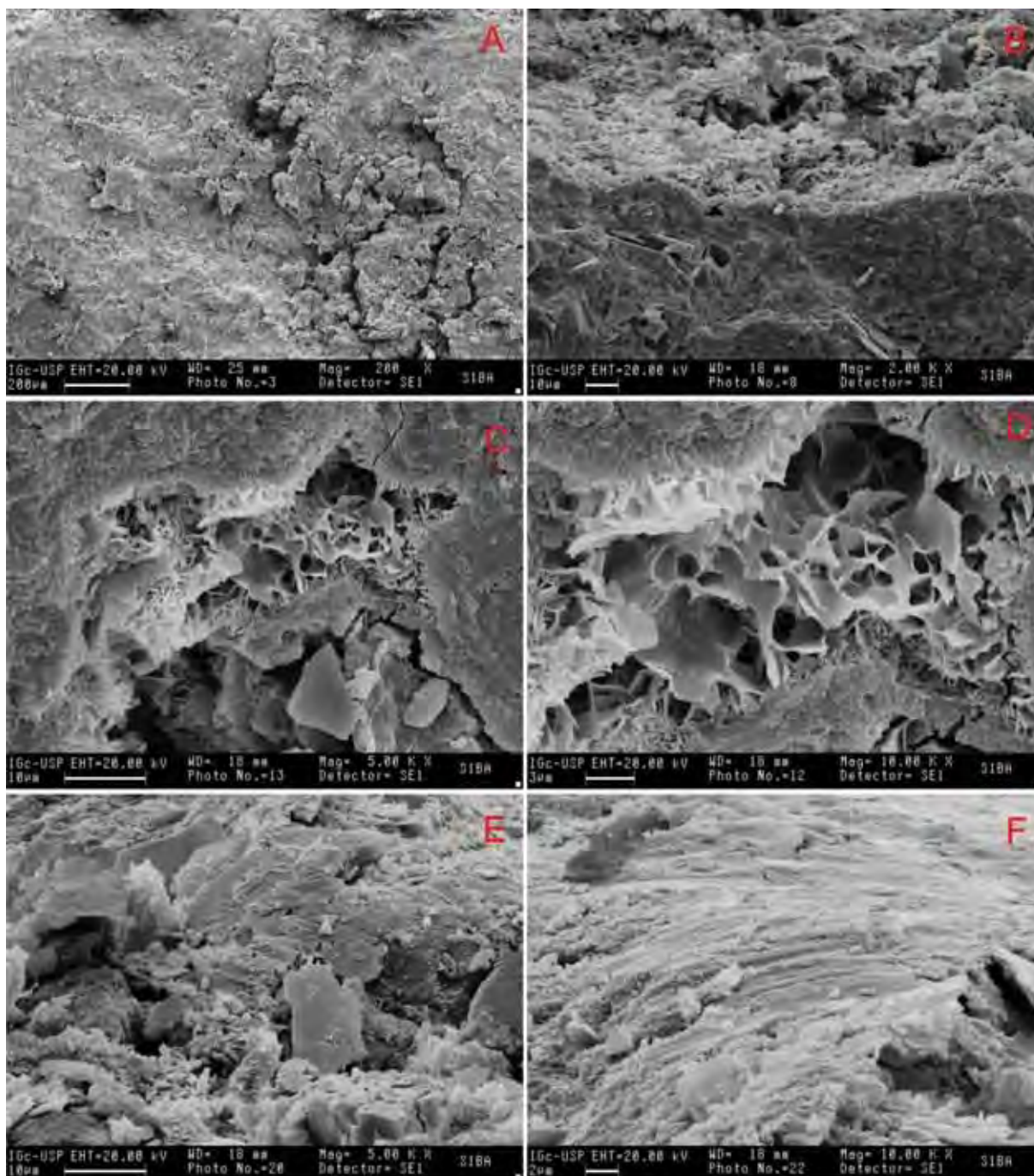


Figura 7.120 – Superfícies fisicamente alteradas e material particulado não-identificado em espeleotemas da amostra S1. A) sulcos na amostra S1; B) diferença entre a superfície da amostra, com evidentes impactos físicos, e sua lateral, que não estava exposta na caverna, com superfície mais preservada; C) fenda natural na amostra, com placas calcíticas, túneis e material particulado depositado e em ampliação maior na foto D. Nas eletromicrografias E e F, material particulado na superfície da amostra.

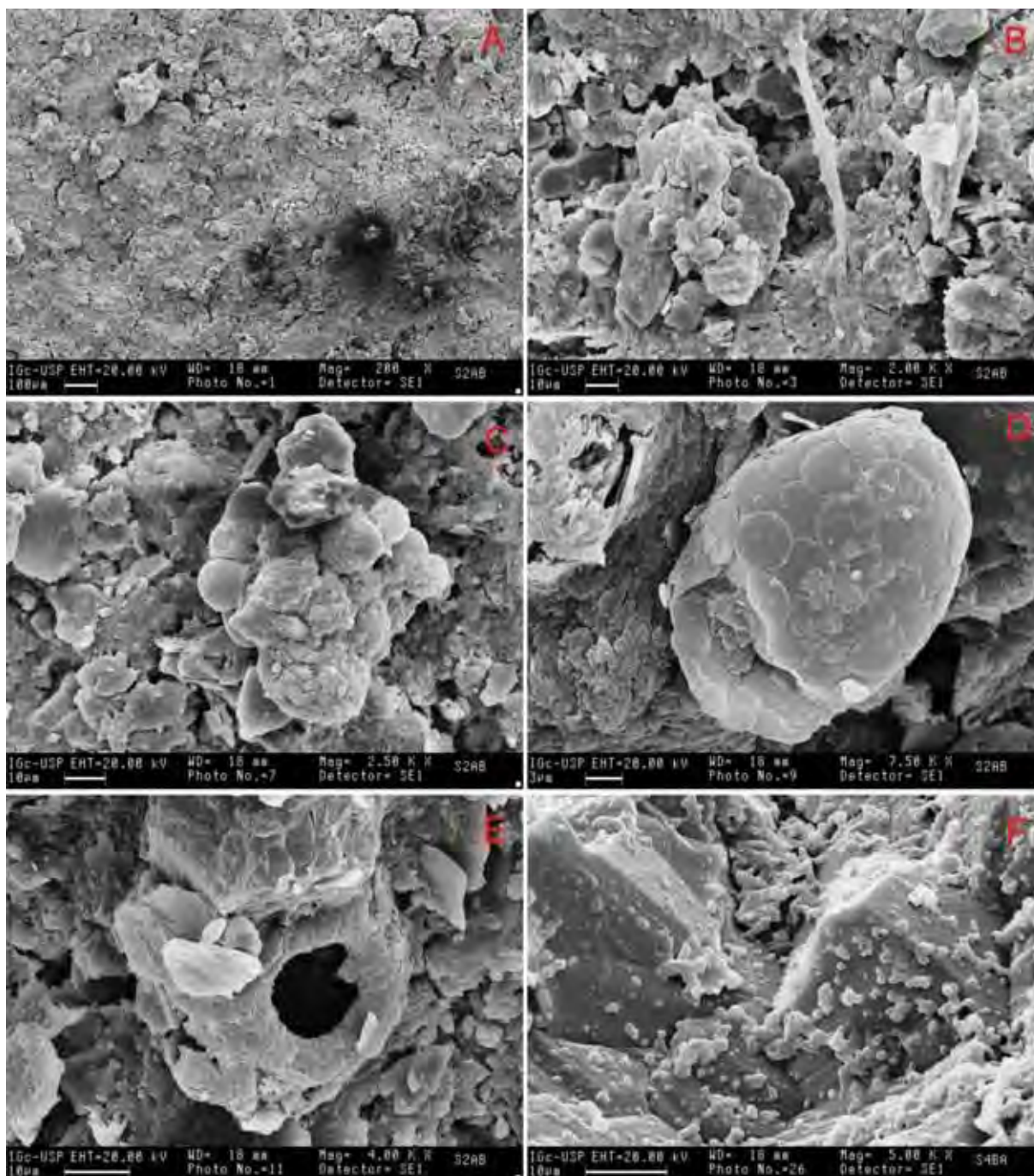


Figura 7.121 – Materiais particulados, biofilmes e material biológico em espeleotemas. A) superfície da amostra S2, com diversidade de material particulado. Um filamento de tecido é identificado na eletromicrografia B. As eletromicrografias C, D e E demonstram prováveis organismos bióticos identificados. A eletromicrografia F ilustra uma alteração da superfície dos cristais de calcita.

A amostra S9A, coletada em área fora do circuito de visitação, apresentou padrão topográfico de superfície totalmente distinto das demais amostras analisadas. As eletromicrografias 7.122A à D demonstram, em diferentes níveis de aumento, as fácies dos cristais de calcita e dois processos evidentes: um de corrosão e outro de desagregação mecânica, possivelmente decorrente da corrosão. Por outro lado, o material particulado, biofilmes e fuligem não foram observados. O

material particulado existente é composto essencialmente por fragmentos de calcita (Figura 7.125), proveniente, muito provavelmente, da própria amostra. Além disso, mesmo nas partes das amostras coletadas na área turística que não estavam expostas ao ambiente subterrâneo, não foram identificados sinais de fuligem, matéria orgânica ou outros fragmentos de material particulado depositados (7.119D, F; 7.120C, D; 7.122E, F). Nas eletromicrografias 7.120C e D, também é possível observar diversos microcristais de calcita, em escala nanométrica, em forma de placas – as quais também podem ser vistas em outras eletromicrografias – e estruturas alveolares. A eletromicrografia 7.122E demonstra cristais de calcita totalmente preservados, os quais são acrescidos de cristais de aragonita na eletromicrografia 7.122F.

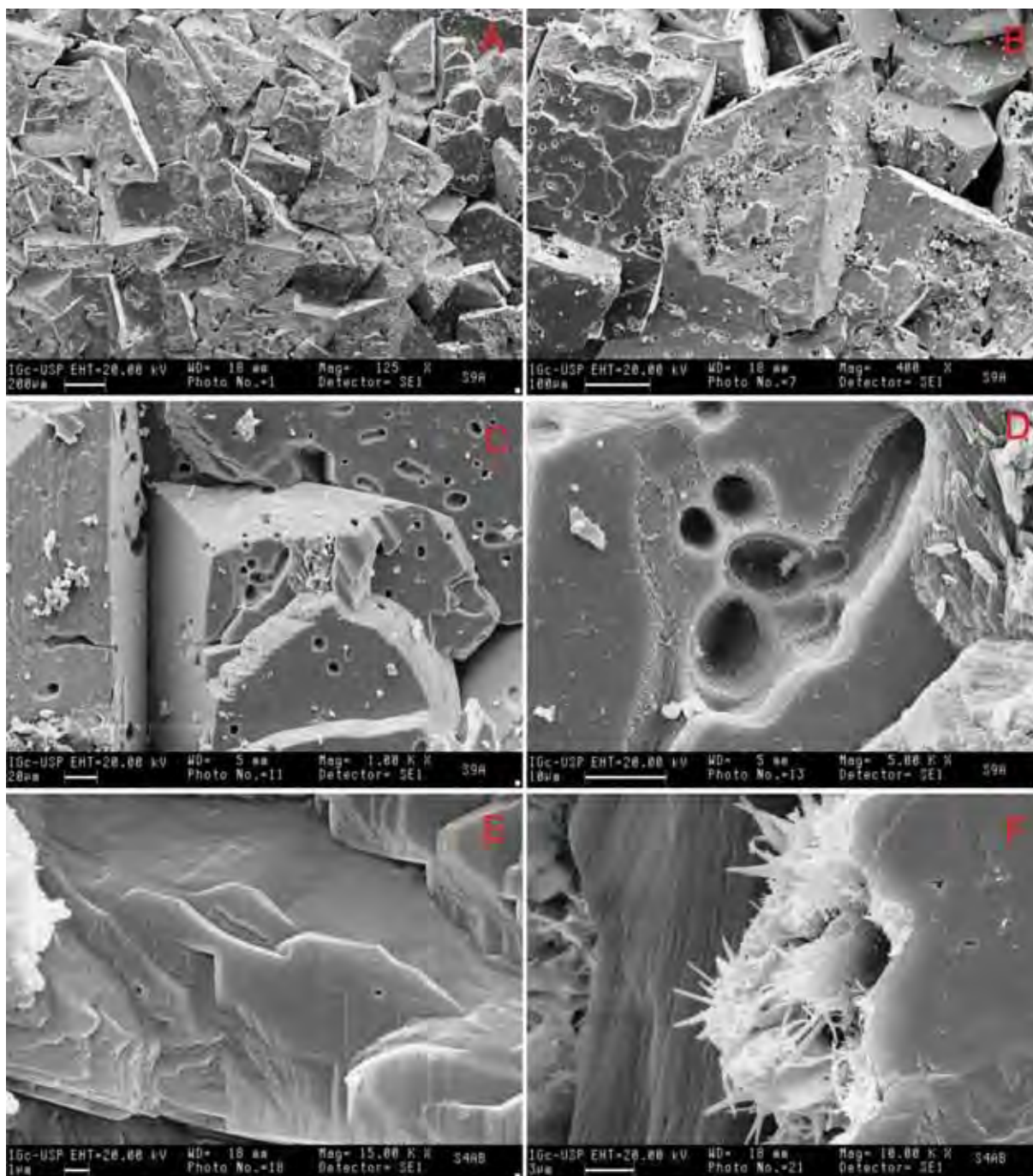


Figura 7.122 – Eletromicrografias de amostras sem aparente impacto antrópico direto. As eletromicrografias A à D são da amostra S9, coletada em trecho da caverna fora do circuito de visitação, onde o fluxo atmosférico não é cumulativo. Mesmo na amostra S4 (E e F), coletada no salão do Cristo, pode-se observar a existência de cristais preservados em sua face que não estava exposta ao ambiente.

Os resultados obtidos em lupa petrográfica e MEV ilustram diferenças físicas nos espeleotemas que apresentam fortes indícios de impactos, além de uma diversidade de material particulado não-identificado. Considerando o uso de carbureteiras durante décadas na caverna de Santana para o espeleoturismo e explorações espeleológicas, foram feitas análises mais específicas em busca de

indícios de contaminação originada nos produtos derivados do CaC_2 , como o acetileno; os contaminantes existentes neste gás em razão da impureza do produto de origem; e o humo, produzido em sua queima. Este último é ilustrado na Figura 7.123.

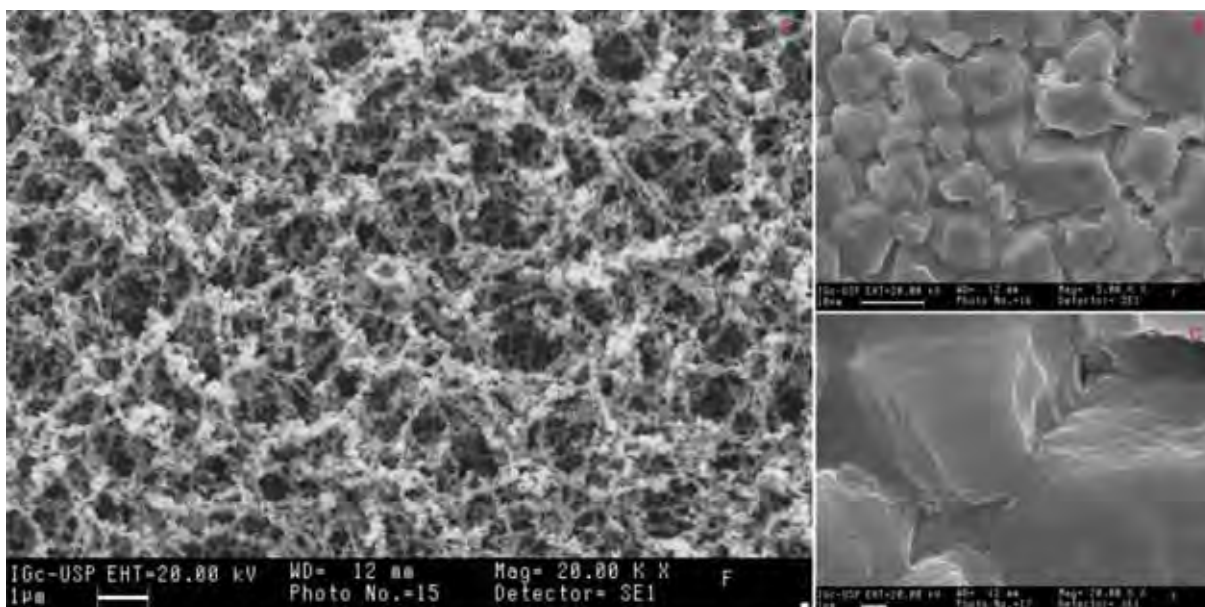


Figura 7.123 – Eletromicrografia da lâmina de vidro (B e C) e de sua posterior contaminação com o humo da queima do acetileno (A).

A análise do humo de carbureto no MEV permitiu a visualização de uma cadeia aglomerada de partículas nanométricas (Figura 7.123A), as quais não foram detectadas individualmente. Para compreensão de seu padrão textural, foram feitas eletromicrografias da placa de vidro (7.123B, C), permitindo a comparação e identificação visual do contaminante. Todavia, deve-se considerar que o padrão de deposição de humo na lâmina de vidro – que foi por queima direta – é diferente do padrão possível dentro de uma caverna, onde a deposição ocorre por decantação aérea. Portanto, o padrão físico das partículas de humo nos espeleotemas é, provavelmente, mais semelhante ao que foi observado nas Figuras 7.120 E e F.

Posteriormente, duas amostras de espeleotemas foram submetidas ao EDS no MEV, para uma primeira tentativa de identificação química de compostos contaminantes (Figuras 7.124 e 7.125).

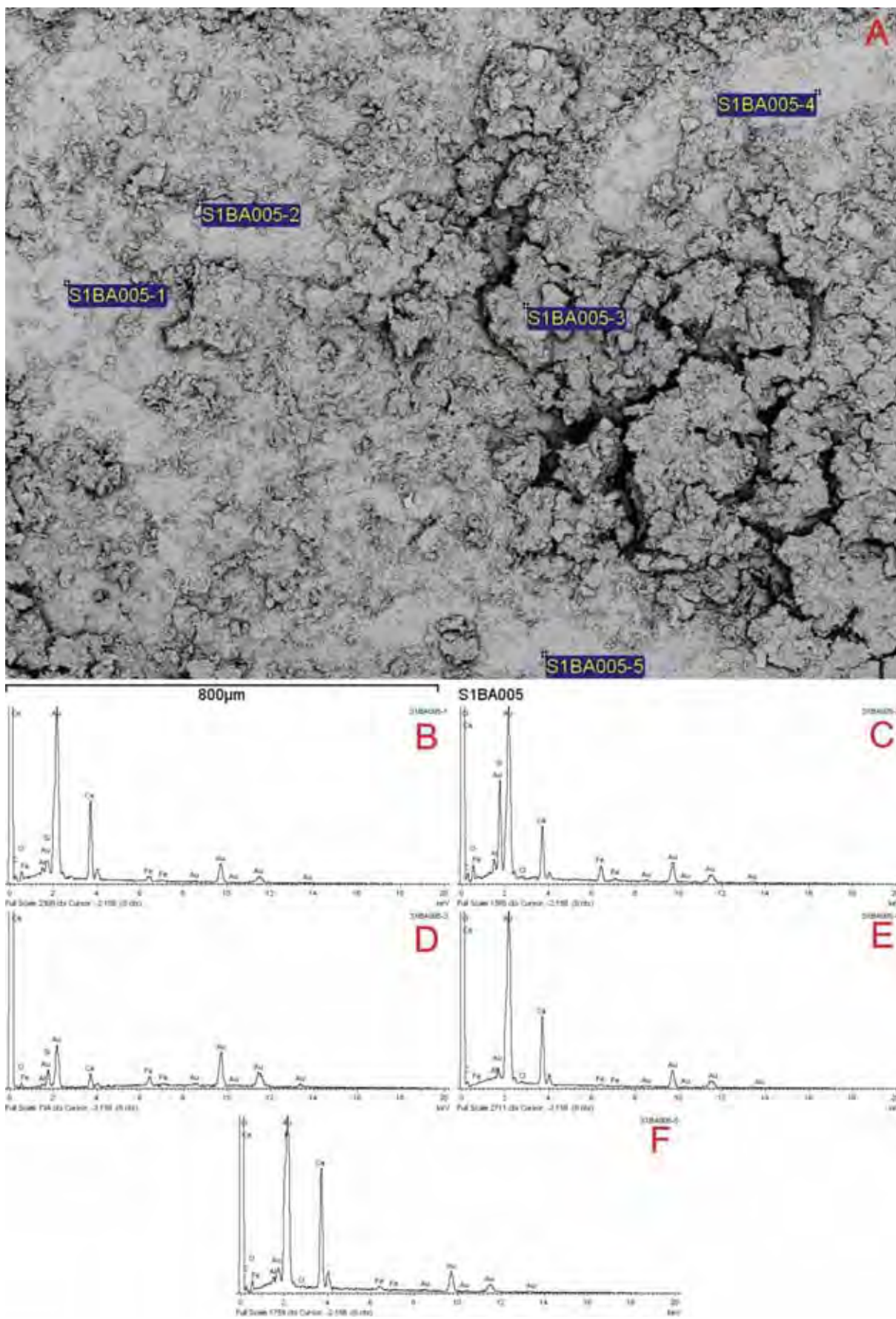


Figura 7.124 – Análise EDS da amostra S1BA

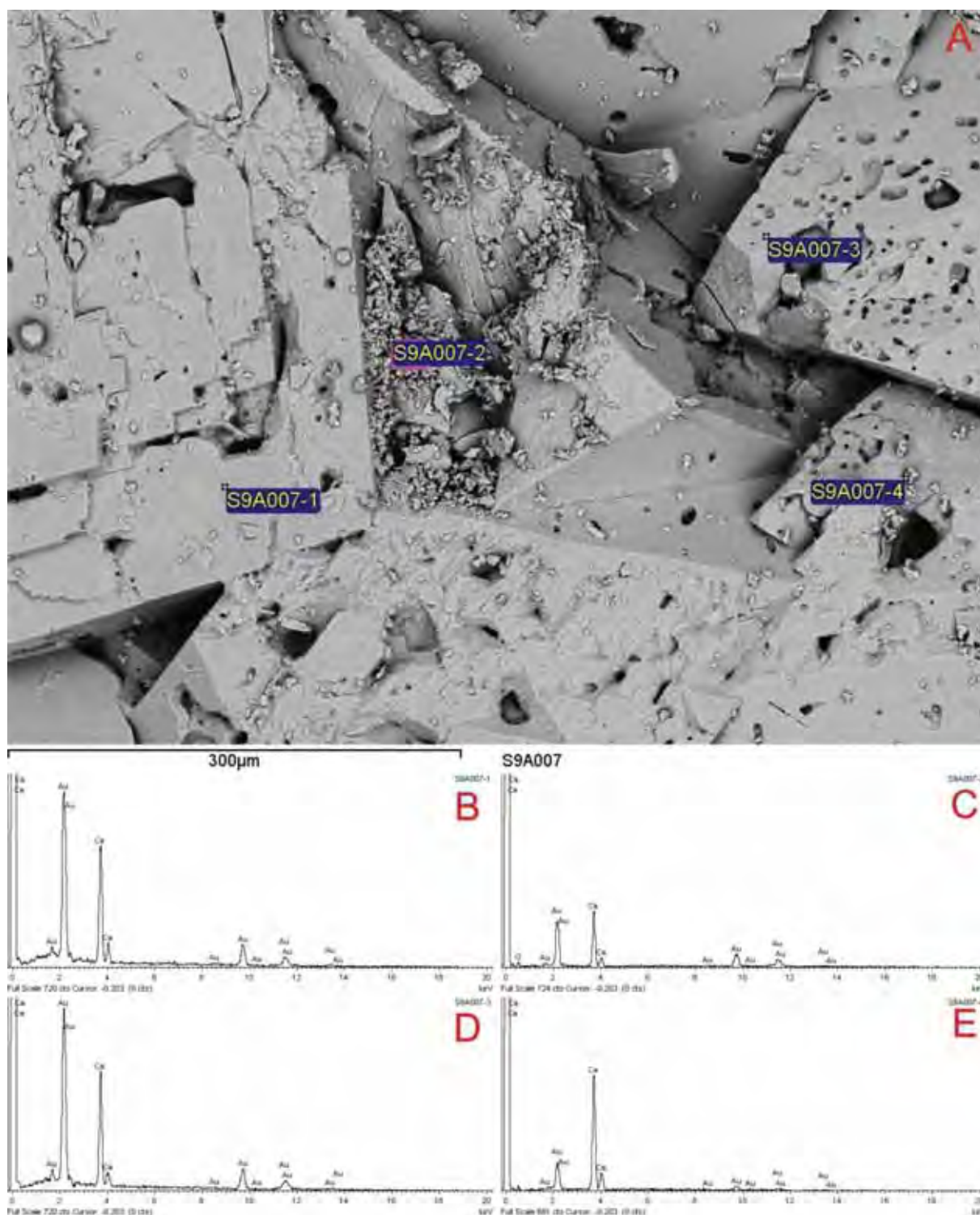


Figura 7.125 – Análise EDS da amostra S9A

Os resultados das análises de EDS da amostra S1BA (Figura 7.124), coletada no circuito de visitação, apresentam como elementos mais comuns o Au – em função do recobrimento da amostra – e o Ca, em razão do substrato carbonático. A presença do C, que pode ser atribuída tanto ao substrato carbonático quanto ao humo do acetileno, foi confirmada em quatro dos cinco perfis realizados (7.124B, C,

E, F). Outros elementos não esperados para as condições naturais do ambiente de coleta foram também identificados, como o Fe, Al, Cl e F. Em contraste, a amostra S9A (Figura 7.125), coletada fora do circuito de visitação, apresentou além do Au, apenas elementos comuns ao meio carbonático (Ca e O). Todavia, o C não foi identificado.

Fechando a série de testes das amostras, são apresentados os resultados das análises químicas com eliminação de carbonatos, feitas em três amostras (Tabela 7.10).

Tabela 7.10 – Resultados das análises químicas de amostras de espeleotemas

Ponto de Coleta	Perda de Massa (%)	Teor de Carbono (%) / Massa resultante	Teor de Carbono (%) / Total da Amostra
S6A	90,77	5,05	0,466
S6A	90,77	4,95	0,456
S9A	>99,99	-	-

O ataque ácido resultou na perda quase total de massa da amostra S9A, evidenciando alto grau de pureza de CaCO_3 em sua composição. As amostras S5A e S6A apresentaram perda média de massa da ordem de 90%, demonstrando com isso que sua composição inclui outros compostos que não somente o CaCO_3 . O resíduo restante do ataque ácido apresentou percentual médio de 5% de composição por C, o que representa, em média, 0,45% da amostra inicial. Considerando a inexistência de contaminantes naturais nas amostras, como fezes de morcegos (guano), atribui-se este significativo percentual ao humo originado na queima do acetileno.

7.8.2. Impactos no espeleoclima

Durante a apresentação dos dados do monitoramento espeleoclimático, foram levantadas questões que remetiam a fatores extrínsecos à atmosfera cavernícola, nas estações Cristo (temperatura do ar e CO_2), Encontro (temperatura do ar e da rocha) e Bacon (temperatura do ar e CO_2). Para uma investigação preliminar destas questões, admite-se a hipótese de que as alterações identificadas foram geradas pela presença humana. Para o aprofundamento da questão, foram obtidos dados da visitação diária da caverna de Santana, entre os dias 23 de agosto/2009 e 2 de

janeiro/2010¹³ e 1° de julho e 14 de setembro de 2010, para a realização de análises de correlação com as variações de temperatura. Os dados de visitação do primeiro destes períodos são exibidos na Figura 7.126.

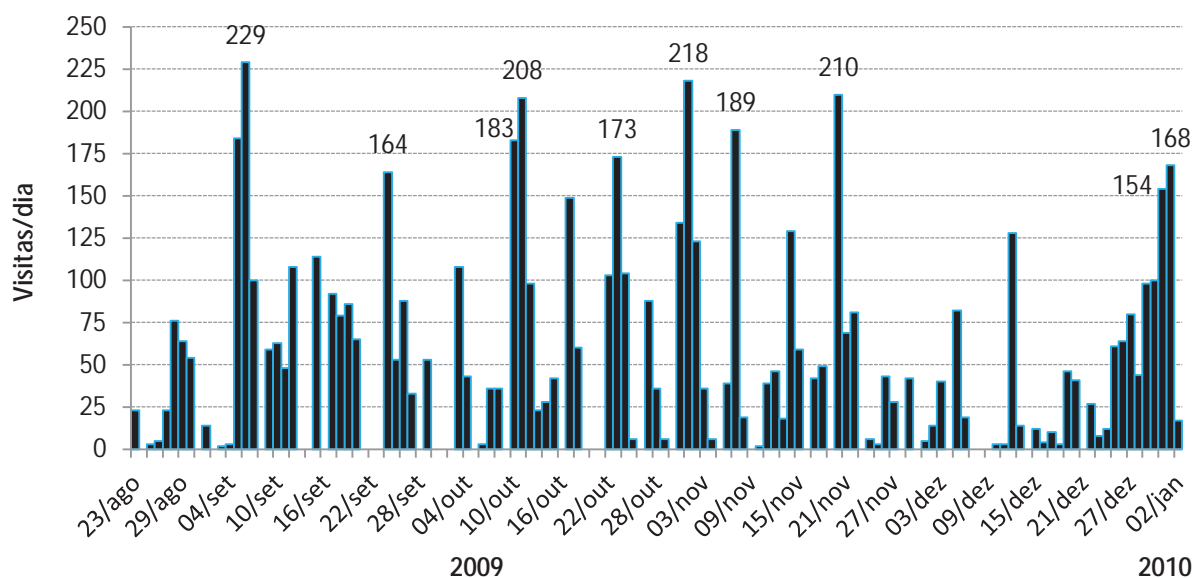


Figura 7.126 – Número de visitas/dia, incluindo os turistas e os monitores na caverna de Santana (Ago./2009 – Jan./2010)

Considerando apenas os meses completos (set. – dez./2009), outubro foi o mês com maior número de visitas, totalizando 1667. A maior visitação diária foi contabilizada no dia 6 de setembro, quando a caverna recebeu 229 visitas, embora diversos outros picos acima de 150 visitas/dia tenham sido registrados.

Os dados de visitação foram, então, cruzados com as máximas diárias das estações cujas análises tenham apresentado alguma anomalia de origem desconhecida. Inicialmente, os confrontos realizados foram com os dados de temperatura do monitoramento anual, das estações Cristo e Encontro (Figura 7.127).

¹³ Usualmente, o PETAR só possui controle mensal de visitas nas cavernas. Os dados diários foram obtidos por meio de uma cooperação do Parque com a presente pesquisa, considerando que o instrumento contador de pessoas *KPeople* não registrou os dados de forma adequada.

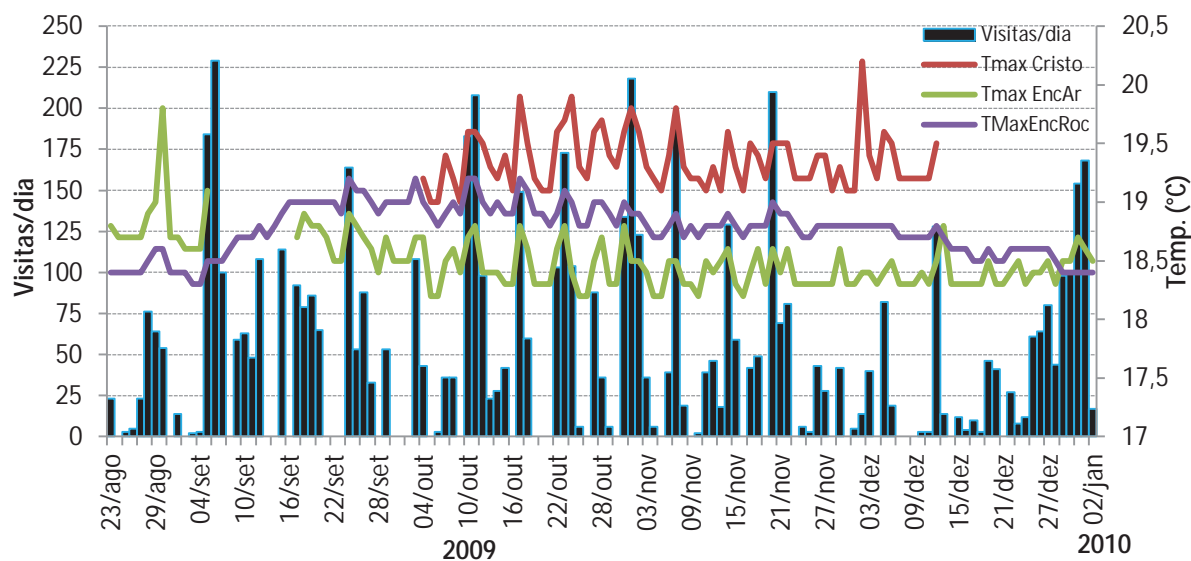


Figura 7.127 – Visitas/dia x temperaturas máximas nas estações Cristo e Encontro, no período entre 23 de agosto de 2009 e 2 de janeiro de 2010

A Figura 7.127 demonstra correlação visual entre as máximas diárias e os picos de visitação. As séries foram, então, submetidas a uma análise estatística descritiva por meio do coeficiente de correlação r de Pearson (Tabela 7.11).

Tabela 7.11 – Matriz de proximidade (r de Pearson) entre as variáveis selecionadas no período entre 23 de agosto de 2009 e 2 de janeiro de 2010

	Cristo	Encontro Ar	Encontro Rocha	Visitantes
Visitantes	0,706	0,622	0,312	1

Os coeficientes para as estações Cristo e Encontro (ar) apresentaram altos índices de correlação, evidenciando a existência de interferências da presença humana nos valores aferidos. Por sua vez, a temperatura da rocha na estação Encontro não apresentou evidência estatística de correlação, o que reflete o já exposto na subseção 7.4.1, que as amplitudes térmicas diárias da temperatura da rocha são mais tênues, mesmo na presença de grandes volumes de visitantes.

Para estes dados, também foi feita a análise estatística descritiva de correlação cruzada (Figura 7.128).

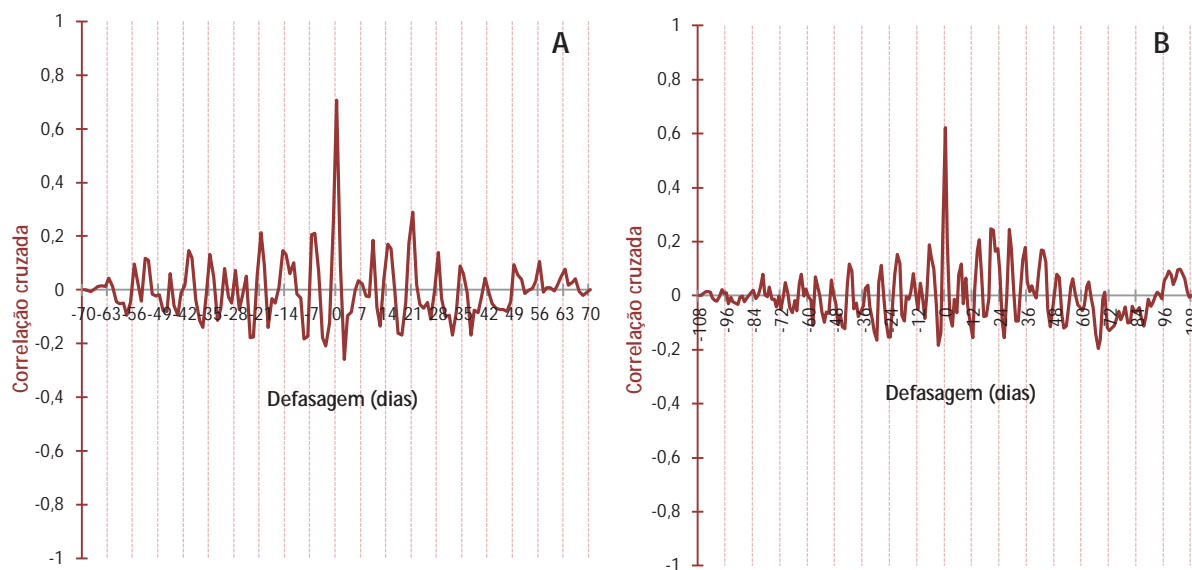


Figura 7.128 – Correlogramas cruzados entre a visitação diária com a estação Cristo (A) e com a estação Encontro (B) no período entre setembro e dezembro/2009

A correlação entre as visitas diárias e as séries selecionadas é bastante significativa. Para a estação Cristo (Figura 7.128A) o índice máximo obtido foi de 0,706, no intervalo zero. Na estação Encontro (7.128B), a correlação foi de 0,622, também sem defasagem temporal. Estes índices, em conjunto com os coeficientes de correlação de Pearson da Tabela 7.11, evidenciam a linearidade entre a entrada de estímulos externos no sistema – a visitação – e a sua respectiva resposta – a excitação pontual na temperatura.

Realizou-se também uma análise entre a visitação no dia 2 de novembro/2009 – um dos dias de pico, com as duas estações analisadas em funcionamento – e as variações horárias na temperatura do ar (Figura 7.129).

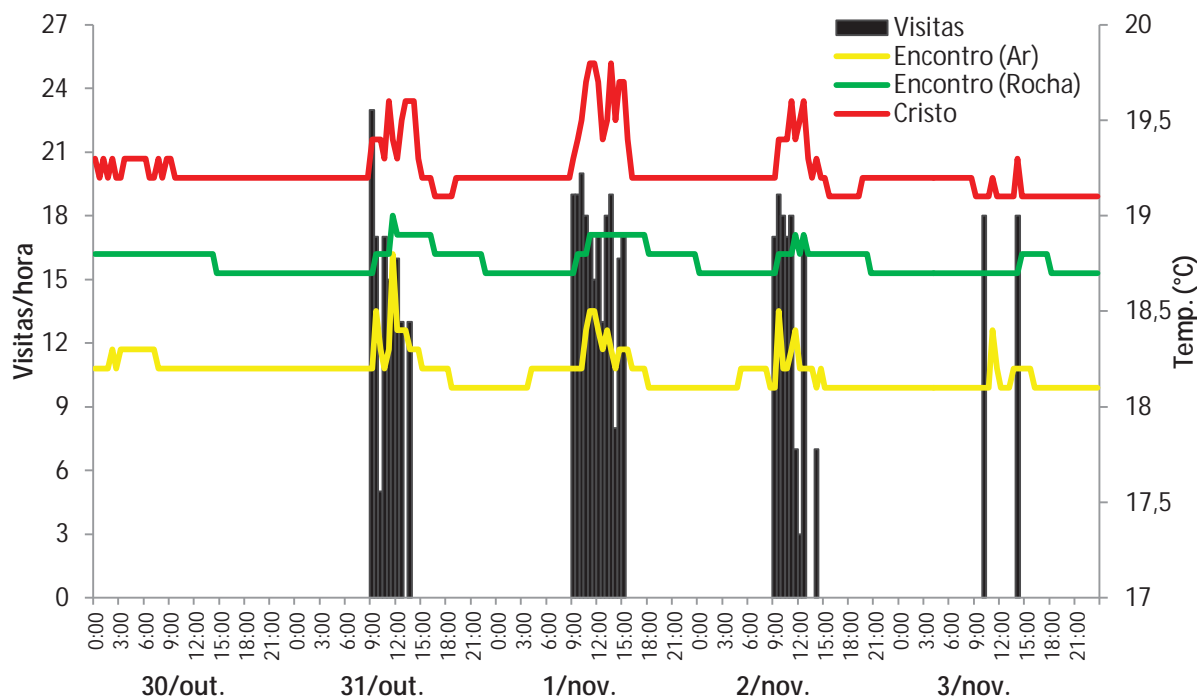


Figura 7.129 – Variações horárias de temperatura das estações Cristo e Encontro, entre os dias 30 de outubro e 3 de novembro de 2009 em relação à visitação

A Figura 7.129 auxilia na comprovação da origem antrópica dos impactos na temperatura nas estações analisadas. Os picos de temperatura coincidem com os horários de visitação, com uma pequena defasagem temporal, o que é coerente com o fato de que o horário disponível é o de entrada na caverna, mas não da passagem pelas estações. No dia 30 de outubro, data em que não houve visitação na caverna, nota-se apenas uma pequena variação sazonal horária, o que condiz com o padrão dos salões monitorados. As variações ocorridas no dia 3 de novembro também chamam a atenção, mesmo com a entrada de apenas dois grupos, um pela manhã e outro pela tarde, de 18 visitantes cada. No entanto, estes eram compostos por estudantes em atividades de estudo do meio, que permanecem mais tempo dentro da caverna, gerando alterações na temperatura. Desta forma, percebe-se de um modo geral que tanto a quantidade de pessoas quanto o tempo de permanência são fatores relevantes para a ocorrência de impactos na atmosfera subterrânea.

Por fim, as análises estatísticas de correlação deste recorte temporal corroboram as conclusões anteriores (Tabela 7.12 e Figura 7.130).

Tabela 7.12 – Matriz de proximidade (r de Pearson) entre as variáveis selecionadas no período entre 30 de outubro e 3 de novembro de 2009

	Cristo	Encontro Ar	Encontro Rocha	Visitas
Visitas	0,721	0,504	0,381	1

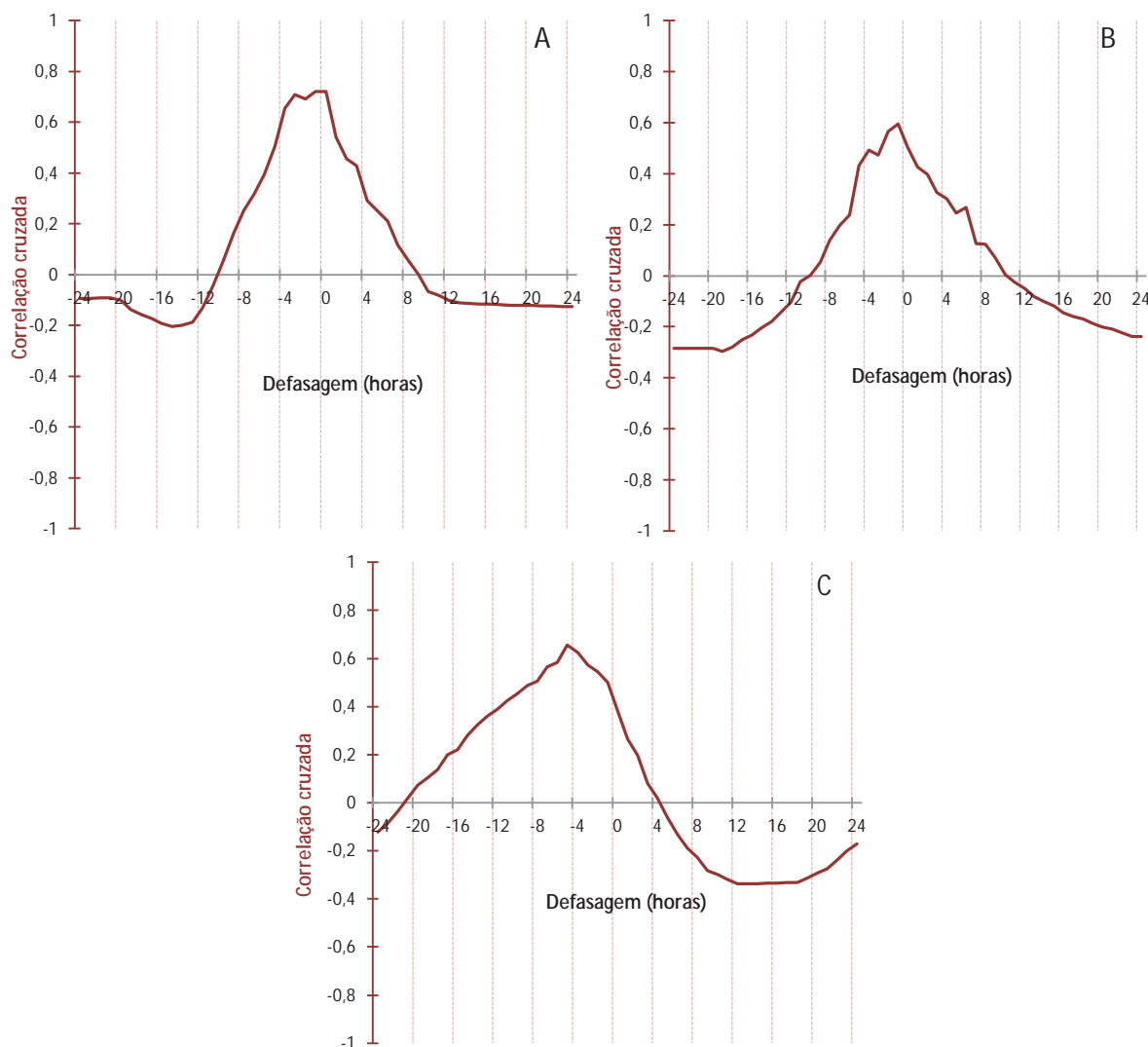


Figura 7.130 – Correlogramas cruzados entre a visitação diária e a estação Cristo (A), a estação Encontro-ar (B) e rocha (C) no período entre 30 de outubro e 3 de novembro de 2009

Os coeficientes exibidos na matriz de proximidade (Tabela 7.12) comprovam estatisticamente a existência de uma correlação significativa entre a entrada de visitantes e a temperatura do ar nas estações Cristo e Encontro. Por outro lado, esta correlação é menos significativa em relação à temperatura da rocha. Os índices de correlação cruzada confirmam esta interpretação, chegando a 0,721 em relação à estação Cristo – com defasagem de 1h (Figura 7.130A); 0,595 em relação à temperatura do ar na estação Encontro, e defasagem temporal de 1h (7.130B); e por fim, 0,657 em relação à temperatura da rocha, com defasagem de 5h (7.130C).

As defasagens temporais são coerentes com a condição de uso da caverna, dado que o horário considerado para a visitação é o de entrada. Entretanto, os grupos levam quase 1h para chegar até a região dos salões Cristo e Encontro. A defasagem maior em relação à temperatura da rocha se explica por esta se tratar de

um meio mais denso, que atenua as variações atmosféricas imediatas, recebendo os impactos em menor intensidade e com atrasos temporais em relação à temperatura do ar (Figura 7.130). Por outro lado, o retorno ao estado habitual de temperatura na rocha é também mais lento. Com base na Figura 7.130, pode-se concluir preliminarmente que, em média, a temperatura do ar na estação Encontro se restabelece em 6-7h para amplitudes térmicas de até 0,6 °C. Quanto à temperatura da rocha, duas hipóteses podem ser levantadas. A primeira delas é que a demora para o retorno da temperatura ocorra em função das condições de monitoramento, como a posição específica do sensor de temperatura em relação à parede. A segunda é a interpretação direta dos dados aferidos, com um intervalo variável entre 12-15h para a dissipação de amplitudes térmicas de até 0,4 °C na rocha. Todavia, estas hipóteses não puderam ser adequadamente investigadas, pela falta de dados de temperatura de rocha na fase final do monitoramento.

A mesma rotina de análise foi feita para os dados do período entre 1° de julho e 14 de setembro de 2010, com algumas especificidades em detalhe. Para início da análise, são apresentados os coeficientes de correlação r de Perason entre as máximas diárias de temperatura das estações externa e cristo e a visitação diária (Tabela 7.13).

Tabela 7.13 – Matriz de proximidade (r de Pearson) entre as variáveis selecionadas no período entre 1° de junho e 14 de setembro de 2010

	Visitas/dia	Tmax Cristo	Tmax Externa
Visitas/dia	1	0,538	0,033
Tmax Cristo	0,538	1	0,159
Tmax Externa	0,033	0,159	1

A análise por meio do coeficiente r de Pearson evidenciou a baixa correlação entre a variação da temperatura no ambiente externo com a estação Cristo para o período em questão, repetindo os resultados de análise anterior (Tabela 7.9). Por outro lado, a correlação entre as máximas de temperatura da estação Cristo com a visitação foi elevada, atingindo 0,538. Esta correlação é mais bem visualizada na Figura 7.131.

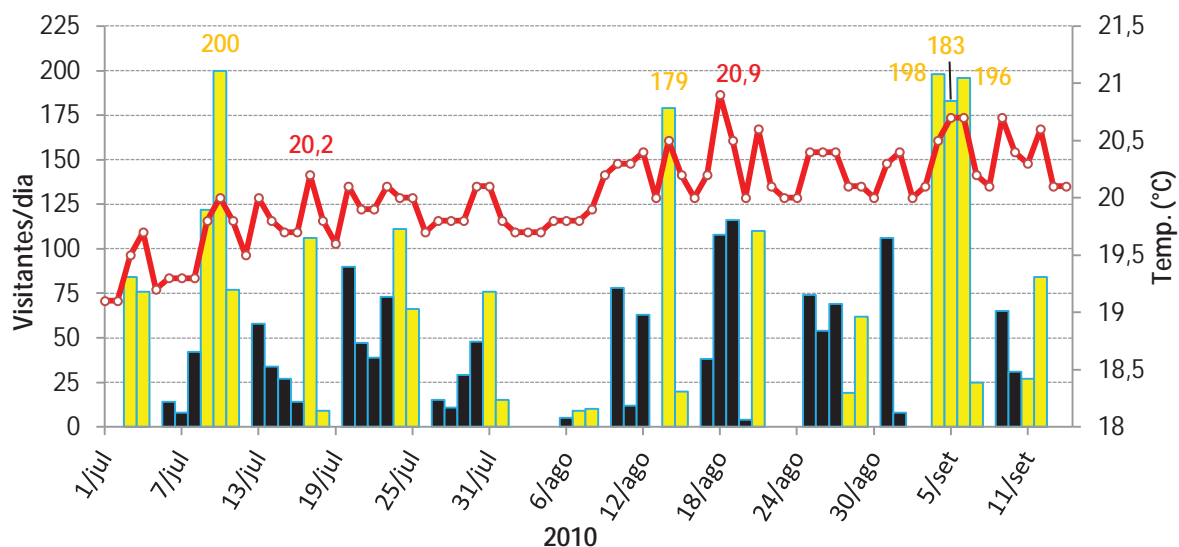


Figura 7.131 – Visitas/dia x temperaturas máximas na estação Cristo, no período entre 1º de junho e 14 de setembro de 2010. As barras pretas são os dias úteis e as amarelas os finais de semana e feriados.

Os resultados exibidos na Figura 7.131 demonstram graficamente a correlação entre a visitação (barras) e as máximas de temperatura da estação Cristo. Todavia, percebe-se a inexistência de uma linearidade entre os picos de visitação – em sua maioria aos finais de semana e feriados – e os maiores picos de temperatura – muitos deles em dias úteis. Nos dias sem visitantes não são observados picos de temperatura máxima.

Para melhor ilustrar a situação descrita acima, foram selecionados dois períodos representativos de visitação: os períodos entre 16 e 22 de agosto e 2 e 8 de setembro de 2010, cuja visualização dos dados é possível na Figura 7.132.

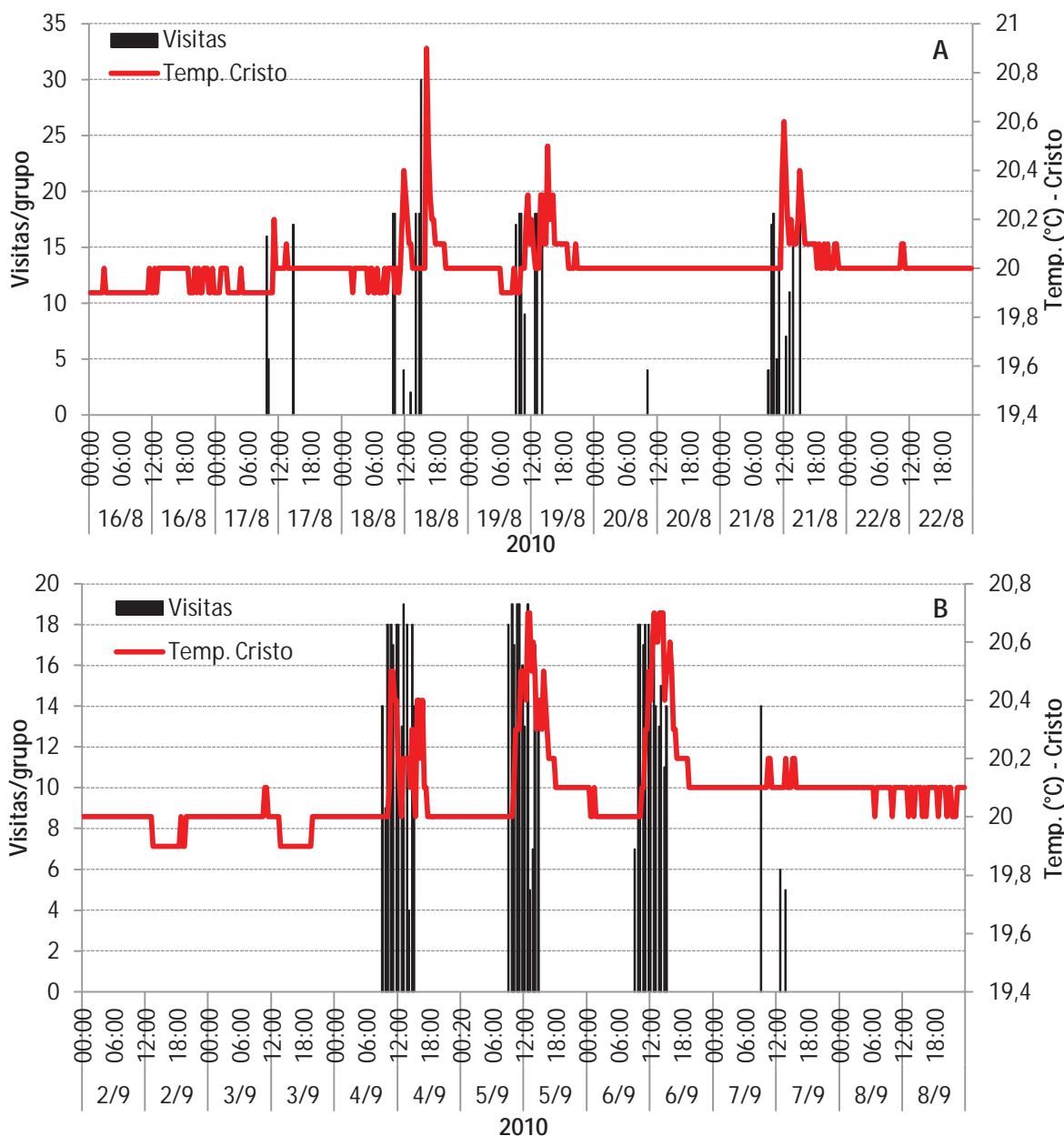


Figura 7.132 – Visitas/grupo x variação da temperatura na estação Cristo, no período entre 16 e 22 de agosto (A) e 2 e 8 de setembro de 2010 (B).

A Figura 7.132 demonstra correlação visual direta entre a entrada de grupos de visitantes e os picos de temperatura na estação Cristo. Na Figura 7.132A, nota-se que grupos maiores, como o de 30 visitantes no dia 18 de agosto, geram picos mais elevados, chegando à 20,9 °C. Grupos menores, de até 20 visitantes, geram picos na casa de 20,5 °C (+- 0,2 °C). Na Figura 7.132B, percebe-se outro padrão, com muitos grupos entrando sequenciados dentro da caverna. Todos foram grupos de menos de 20 visitantes, gerando picos de no máximo 20,6 °C. Esta correlação visual foi testada estatisticamente, por meio dos coeficientes de correlação r de Pearson e pela função de autocorrelação (Tabelas 7.14 e 7.15; Figura 7.133).

Tabela 7.14 – Matriz de proximidade (r de Pearson) entre as variáveis selecionadas no período entre 16 e 22 de agosto de 2010

	Visitas	Temp. Cristo
Visitas	1	0,057
Temp. Cristo	0,057	1

Tabela 7.15 – Matriz de proximidade (r de Pearson) entre as variáveis selecionadas no período entre 2 e 8 de setembro de 2010

	Visitas	Temp. Cristo
Visitas	1	0,447
Temp. Cristo	0,447	1

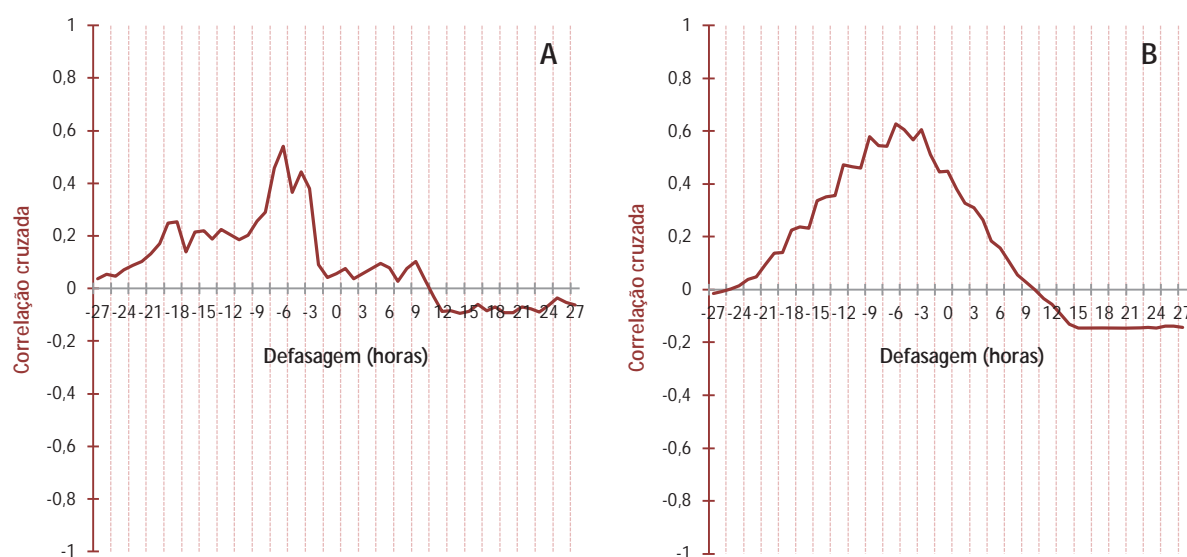
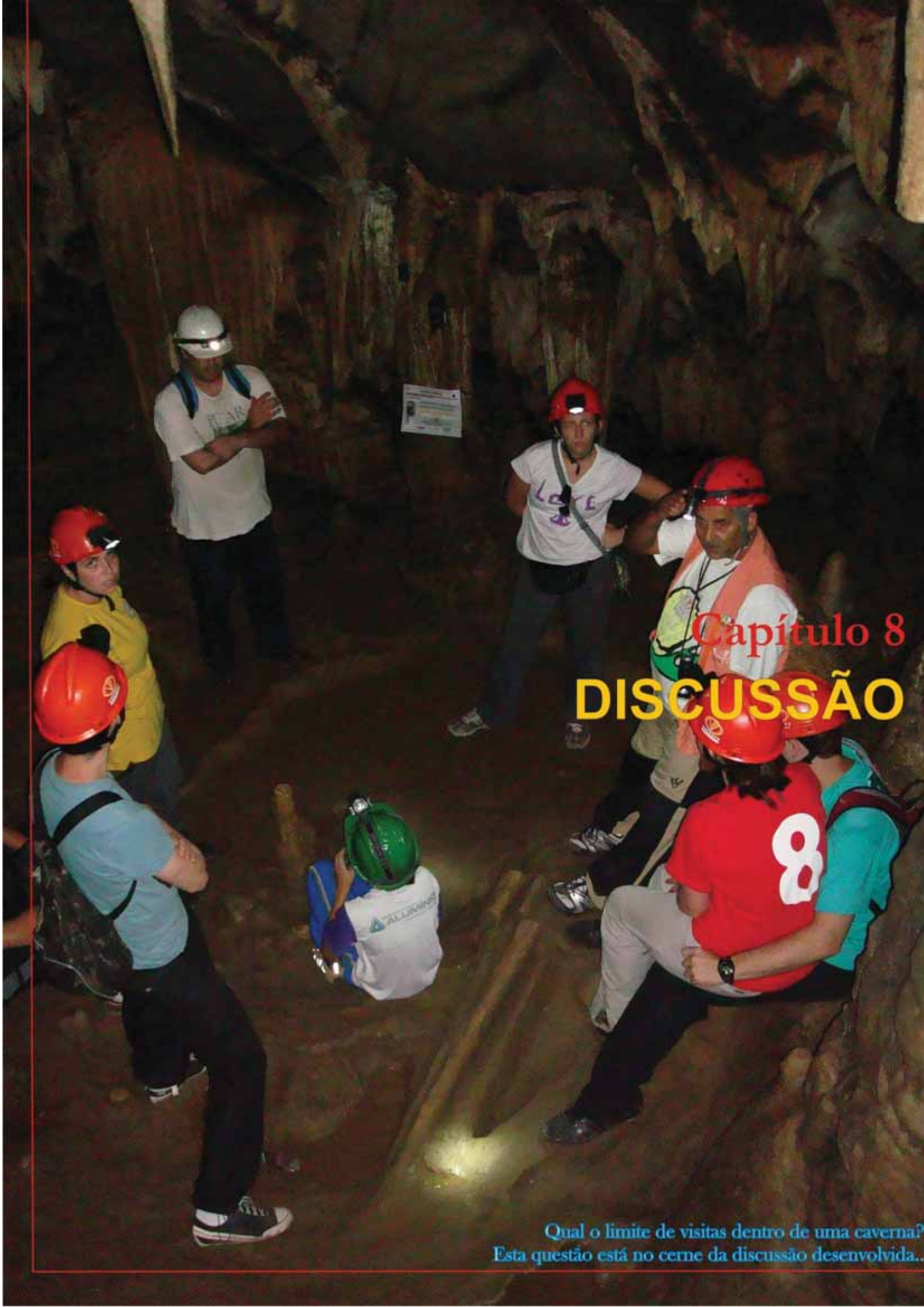


Figura 7.133 – Correlogramas cruzados entre a visitação diária e a estação Cristo, no período entre 16 e 22 de agosto (A) e 2 e 8 de setembro de 2010 (B)

As análises estatísticas descritivas por meio do coeficiente r de Pearson demonstraram uma baixa correlação entre as séries de dados dos dias 16 a 22 de agosto (Tabela 7.14), com coeficiente igual à 0,057, e uma correlação elevada para a série de 2 a 8 de setembro (Tabela 7.15), atingindo um coeficiente de 0,447. Os índices de correlação cruzada atingiram o valor máximo de 0,540, com defasagem de 6h na série de agosto (Figura 7.133A) e de 0,628 com a mesma defasagem na série de setembro (Figura 7.133B). Embora sejam correlações estatísticas, as defasagens são coerentes com o padrão de controle de entrada de visitantes adotado e a dinâmica de visitação na caverna de Santana.



Capítulo 8
DISCUSSÃO

Qual o limite de visitas dentro de uma caverna?
Esta questão está no cerne da discussão desenvolvida..

8. DISCUSSÃO

8.1. Apresentação

No capítulo anterior foram apresentados os resultados das pesquisas de campo, antecipando as análises básicas dos parâmetros atmosféricos, por estação de monitoramento e por variável, bem como análises integradas dos dados atmosféricos. Além disso, foram demonstrados os principais impactos e danos causados pela visitação na caverna de Santana.

No presente capítulo são estabelecidas discussões sobre a dinâmica atmosférica da caverna de Santana, sobre os impactos do espeleoturismo e sobre a principal hipótese da pesquisa, de obtenção de parâmetros e procedimentos metodológicos para o adequado manejo do ambiente subterrâneo.

8.2. Dinâmica atmosférica subterrânea

A atmosfera das cavernas com grande restrição espacial nos acessos à rede subterrânea de condutos, como é o caso da caverna de Santana, é constituída de espeleoclima parcialmente isolado em relação ao meio externo que a circunda. Esta característica fundamental deve ser salientada de antemão, para estabelecer o espectro de possibilidades de comparações futuras e aplicações dos métodos, resultados e conclusões obtidos nesta pesquisa em situações análogas. De igual

forma, torna-se importante lembrar que o microclima externo possui particularidades que devem ser consideradas para efeitos de caracterização e de comparação. O confinamento da atmosfera adjacente à caverna em compartimentos de fundo de vale – típicos da paisagem estudada – e a espessa cobertura vegetal da Mata Atlântica, são fatores de ordem fisiográfica e fitofisionômica pontuados como fundamentais para a caracterização de um microclima, conforme Geiger (1951) e Bailey (2005). A localização do Vale do Ribeira em região de clima subtropical, de ritmo irregular em área de influência oceânica secundária (GUTJAHR; TARIFA, 1993) também é importante para esta delimitação inicial. Outras questões certamente interferem nos possíveis resultados a serem futuramente obtidos, como a inexistência de cursos d'água ativos – ao contrário da caverna de Santana – ou mesmo a espessura da cobertura rochosa, aspectos estes que permitem uma nova gama de hipóteses para futuras pesquisas espeleoclimáticas.

Não obstante a estas restrições à circulação atmosférica no ambiente externo, a intensidade de trocas gasosas na caverna de Santana é delimitada pela restrição de aberturas em relação ao meio externo, como a ressurgência do rio Roncador e outras aberturas em galerias superiores, à exemplo do trecho conhecido como Santaninha. Todavia, estas aberturas não permitem a geração de fluxos intensos, os quais são condicionados pela pressão diferencial da densidade do ar, tal como explicam os modelos de Mangin; Andrieux (1998) e Cigna (2004). Para tanto, além da diferença de altitude entre as aberturas, seria necessária a existência de condutos que permitissem, ainda que de forma relativa, a circulação de ar para a ampliação da dinâmica de termorregulação, tal como observado, por exemplo, na caverna Água Suja, localizada as proximidades da caverna de Santana, no PETAR.

A caverna Água Suja é drenada pelo córrego Água Suja, cuja ressurgência, assim como na Santana, fornece o principal acesso para o seu interior. Em sua porção mediana, um grande desabamento e processos de dissolução formaram um desnível de mais de 100 m de altura, cujo ápice possui contato direto com o meio externo, formando o abismo Dívida Externa (Figura 8.1A). A movimentação de ar nesta cavidade, em função da pressão exercida pela densidade do ar que entra pelo abismo em temperatura diferente daquela no interior da caverna, pode ser constatada diretamente no trecho conhecido como “túnel de vento”, onde a

velocidade do ar variou entre 0,7 e 1,1 m/s¹⁴, no sentido abismo – ressurgência. Tais valores foram maiores que a velocidade máxima de 0,2 m/s aferida nas galerias da caverna de Santana. Esse exemplo demonstra que cada caverna tem uma dinâmica atmosférica particular, o que limita a extrapolação direta dos resultados obtidos, mesmo em cavernas próximas.

Na caverna de Santana, as paleorressurgências acima da ressurgência atual, ou se ligam com a galeria do rio, ou passam por ligações demasiadamente restritas em redes de condutos labirínticos, até obter contato com condutos e salões mais amplos. Com isso, a circulação de ar é dificultada pelas inúmeras barreiras físicas existentes no caminho (Figura 8.1B).

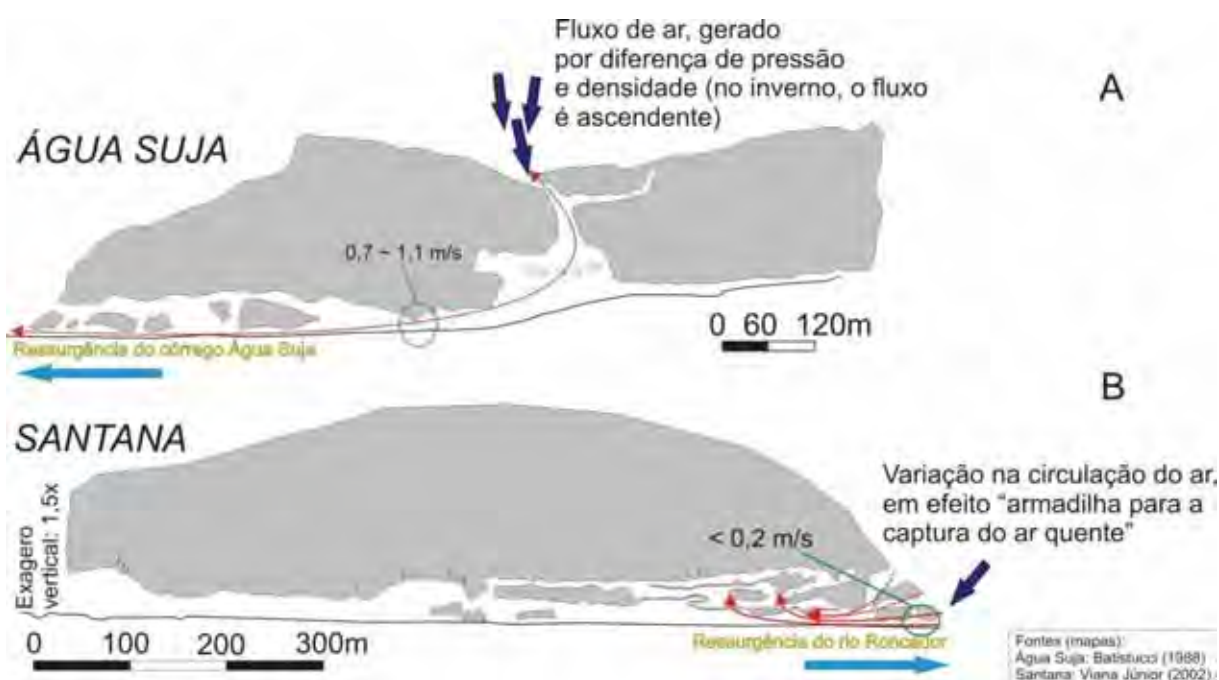


Figura 8.1 – Seção longitudinal simplificada das cavernas Água Suja (A) e Santana (B) e seus respectivos modelos preliminares de fluxo de ar

Qualitativamente, a caverna de Santana pode ser classificada como uma “armadilha para a captura do ar quente¹⁵”. A sua conformação física, com extensa rede de galerias desenvolvidas acima do plano horizontal, faz com que as massas de ar mais frio do interior da caverna criem um fluxo em direção ao ambiente externo nos períodos mais quentes (CIGNA, 1967, 2004; MANGIN; ANDRIEUX, 1988), o que se aplica à variação diuturna ou mesmo às estações climáticas do ano. Isto acontece por um princípio de equilíbrio termodinâmico, ativando a manutenção de

¹⁴ Em experimento realizado no dia 16.01.2010, no verão, por volta das 11h.

¹⁵ *Warm trap*, no original. Cigna (2004, p. 472).

condições primárias de estabilidade entre os parâmetros atmosféricos, em uma dinâmica homeostática (WATSON; LOVELOCK, 1993). Quando o ar no ambiente externo está relativamente mais frio do que no interior da caverna, o fluxo se inverte. Este se dirige para o interior da caverna, que se tiver uma conformação física como a da caverna de Santana, fará com que a circulação de ar seja limitada pela formação de bolsões de ar quente nas partes mais altas e confinadas do sistema (Figura 8.1B), tal como o modelo apresentado em Cigna (2004). A existência de pequenas clarabóias próximas à ressurgência do rio Roncador gera também uma circulação periférica de ar, mas obedecendo aos princípios de termorregulação já comentados. Os fluxos de ar identificados com o uso de fumaça, bem como as aferições por anemômetro, embora em experimentos bastante pontuais, corroboram esta interpretação.

Entretanto, os dados do monitoramento de temperatura do ciclo anual na caverna de Santana demonstraram que o modelo em questão deve ser interpretado com certas reservas para cavidades com redes complexas de galerias. A título de exemplo, foram selecionados dados representativos do monitoramento, da estação fria do ano de 2009, ilustrados na Figura 8.2.

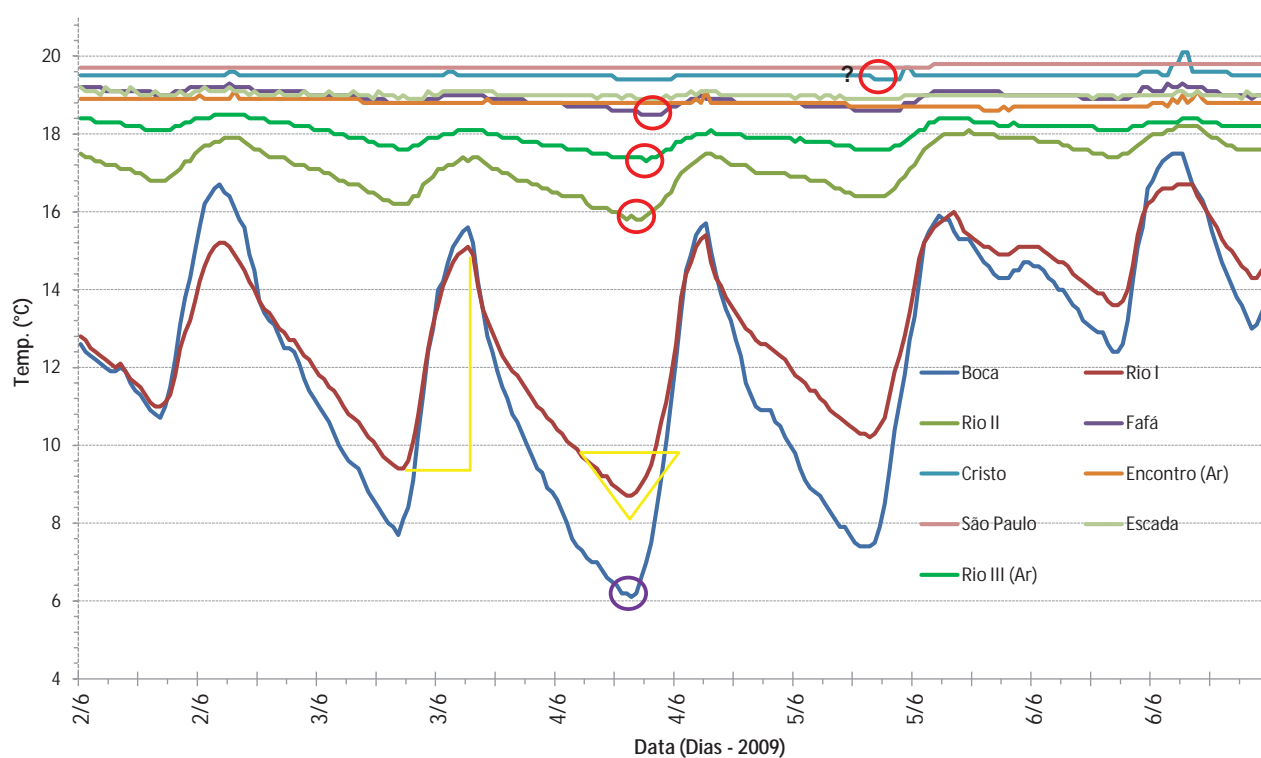


Figura 8.2 – Série selecionada entre os dias 02 e 06 de junho de 2009, com dados de nove estações de monitoramento, ilustrando a amplitude térmica (linha amarela) e a mínima de 8,7 °C (triângulo amarelo) na estação Rio I. Os círculos vermelhos evidenciam que o fenômeno de resfriamento do ar no ambiente externo – aferido pela estação Boca (círculo roxo) –, afeta outras estações mais ao fundo da caverna (círculo vermelho)

Tal como descrito em Mangin; Andrieux (1988) e Cigna (2004), a Figura 8.2 demonstra que no inverno as temperaturas em salões superiores e zonas mais profundas são mais elevadas do que nas regiões próximas à boca e no meio externo. As estações Boca, Rio I e Rio II tiveram sua temperatura variando abaixo da casa dos 18 °C. As estações Fafá, Cristo, Encontro e São Paulo, por sua vez, tiveram flutuações menores na temperatura e sempre acima dos 18 °C. A estação Rio III variou sua temperatura em um meio-termo entre estes dois grupos, na escala entre 17,3 °C e 18,5 °C, demonstrando um provável limite no interior da caverna de penetração horizontal das massas de ar frio originadas no ambiente externo.

A mesma figura exhibe, por meio dos círculos vermelhos, a dissipação das ondas de ar frio para o interior da caverna, afetando diversas estações da galeria superior. Com isso, sugere que parte das direções de fluxo de ar inferidas (Figura 7.111) poderia se inverter, gerando um ambiente predominantemente cumulativo na estação fria do ano, em direção às galerias superiores, impelido pelas massas de ar frio do exterior da caverna. A correlação dos dados do período analisado (Tabela 8.1) auxilia nesta interpretação.

Tabela 8.1 – Matriz de proximidade (*r* de Pearson) entre as variáveis selecionadas

	Boca	Rio I	Rio II	Rio III	Fafá	Cristo	Encontro	Escada	São Paulo
Boca	1	0,970	0,939	0,866	0,798	0,431	0,021	0,463	0,550
Rio I	0,970	1	0,959	0,814	0,702	0,436	-0,134	0,352	0,669
Rio II	0,939	0,959	1	0,914	0,808	0,437	-0,073	0,395	0,691
Rio III	0,866	0,814	0,914	1	0,933	0,370	0,182	0,529	0,483
Fafá	0,798	0,702	0,808	0,933	1	0,436	0,313	0,596	0,380
Cristo	0,431	0,436	0,437	0,370	0,436	1	0,157	0,242	0,305
Encontro	0,021	-0,134	-0,073	0,182	0,313	0,157	1	0,445	-0,478
Escada	0,463	0,352	0,395	0,529	0,596	0,242	0,445	1	-0,086
São Paulo	0,550	0,669	0,691	0,483	0,380	0,305	-0,478	-0,086	1

As séries analisadas são compostas de 240 observações contínuas, sem lacunas no monitoramento. A inexistência de dados da estação Externa no período limita a comparação dos dados do interior da caverna com a estação Boca, a única do lado externo que estava funcionando no período. Os índices de correlação são elevados em relação às estações Rio I (0,970), Rio II (0,939), Rio III (0,866) e Fafá (0,798). Em menor grau, apresentam correlação positiva também as estações São Paulo (0,550), Escada (0,463) e Cristo (0,431). Esta última precisa ser observada

com restrições, dada à comprovada interferência antrópica em sua temperatura. Por fim, a estação Encontro apresentou baixa correlação com a estação Boca.

As massas de ar quente confinadas nas galerias superiores também apresentam um comportamento dinâmico de trocas atmosféricas, quer por condutividade térmica, quer por fluxo direto de ar em escalas imperceptíveis nos padrões de aferição direta adotados. Esta condição enfatiza ainda mais os apontamentos de trabalhos sobre espeleoclimatologia, tais como Cigna (1967), Cigna; Forti (1986), Pflitsch; Piasecki (2003) e Luetscher; Jeannin (2004), que explicitam, sob diferentes aspectos, que mesmo em zonas mais profundas o espeleoclima não é estático e constante. Ainda que em escala relativamente reduzida, sempre ocorrem modificações, que passam a ser a chave para entendimento da dinâmica espeleoclimática e dos mecanismos de acúmulo e dispersão de fluxos gasosos.

Para uma investigação mais aprofundada desta dinâmica, foram selecionados outros dois intervalos de dados, um na estação fria e outro na quente, onde existisse pelo menos uma estação na galeria do Rio e uma nas galerias superiores funcionando em concomitância com a estação externa.

Para a estação fria, foi selecionado o mês de julho/2009. Os coeficientes de correlação entre as séries selecionadas são exibidos na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 – Matriz de proximidade (r de Pearson) entre as variáveis selecionadas

	Externa	Rio I	Fafá	Encontro	Rio III
Externa	1	0,638	0,302	0,358	0,308
Rio I	0,638	1	0,142	0,446	0,433
Fafá	0,302	0,142	1	0,006	-0,094
Encontro	0,358	0,446	0,006	1	0,939
Rio III	0,308	0,433	-0,094	0,939	1

Os coeficientes da Tabela 8.2 evidenciam duas fortes correlações entre os dados: Externa x Rio I (0,638) e Encontro x Rio III (0,939). A correlação da estação Externa com a estação Encontro teve sua significância ampliada em relação à análise anterior, provavelmente, em função da adoção de um intervalo amostral mais amplo.

Quanto à série da estação quente, o período selecionado foi entre os dias 10 e 18 de fevereiro de 2010. Os coeficientes de correlação entre as estações que estavam funcionando neste período são apresentados na Tabela 8.3.

Tabela 8.3 – Matriz de proximidade (r de Pearson) entre as variáveis selecionadas

	Externa	Boca	Rio II	Encontro	Cristo	Discos
Externa	1	0,885	0,188	0,663	0,611	0,172
Boca	0,885	1	0,111	0,562	0,538	0,122
Rio II	0,188	0,111	1	0,289	0,429	0,334
Encontro	0,663	0,562	0,289	1	0,738	0,232
Cristo	0,611	0,538	0,429	0,738	1	0,252
Discos	0,172	0,122	0,334	0,232	0,252	1

A Tabela 8.3 confirma a forte correlação positiva entre a estação Externa e as estações Boca (0,885), Encontro (0,663) e Cristo (0,611), bem como uma baixa correlação com as estações Rio II (0,188) e Discos (0,172). Além disso, Encontro e Cristo possuem uma forte correlação entre si, com coeficiente igual à 0,738.

A interpretação dos dados sazonais dos períodos frios e quentes do ano complementa as considerações sobre a circulação atmosférica para a caverna de Santana. Para tanto, as séries completas foram divididas entre os meses mais frios e mais quentes, para uma análise estatística descritiva. Dos resultados obtidos, as máximas e as mínimas mensais fornecem substanciais contribuições à análise em curso, sendo apresentadas na forma gráfica na Figura 8.3.

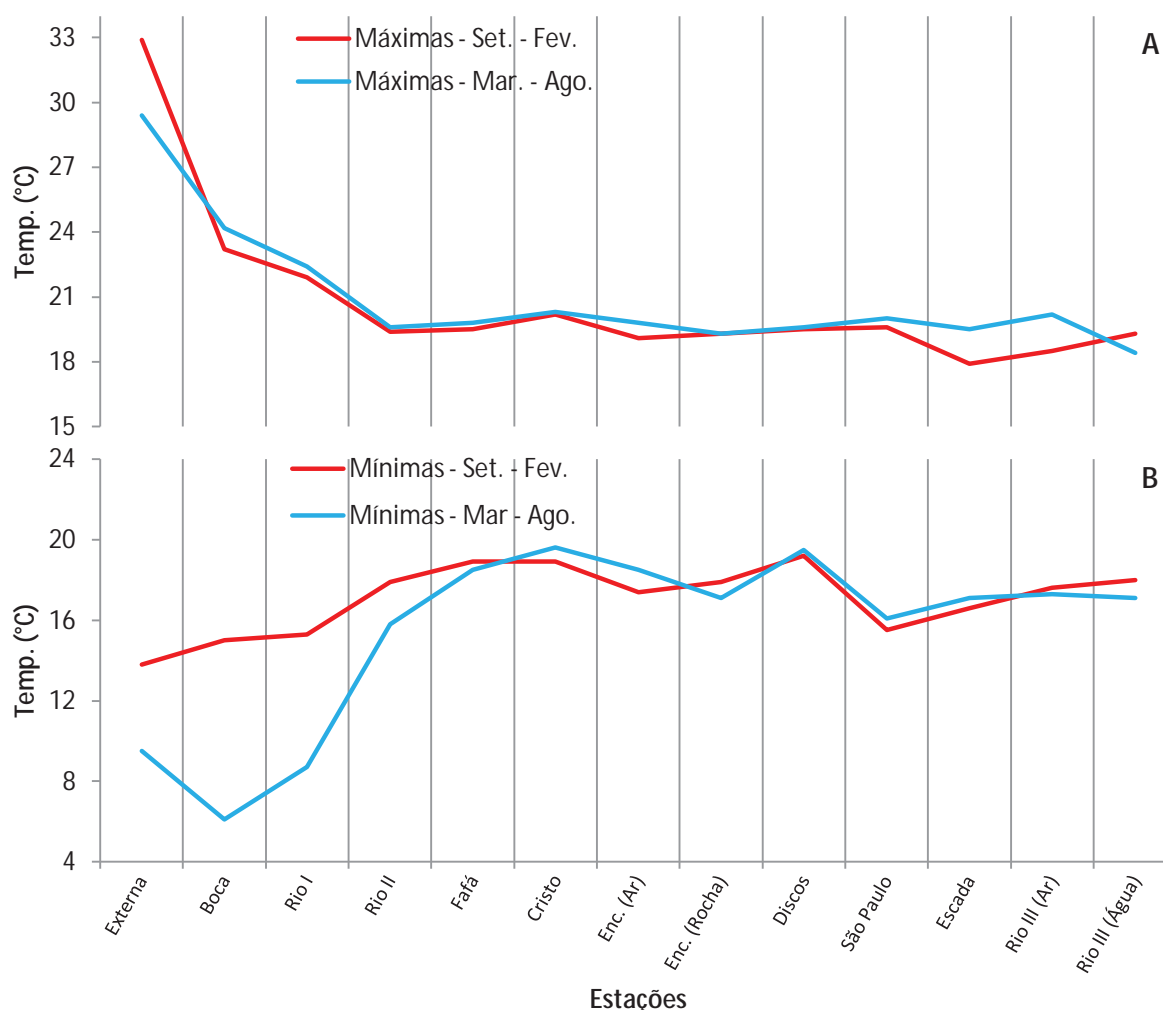


Figura 8.3 – Medidas de dispersão: máximas (A) e mínimas (B), por estação de monitoramento e considerando os períodos frio e quente do ano

As medidas de dispersão apresentadas na Figura 8.3 ilustram as diferenças de circulação de ar na caverna de Santana nos períodos quente e frio do ano, corroborando as interpretações das figuras e tabelas anteriores. No período mais frio (março – agosto), as máximas por estação no interior da caverna são superiores as máximas do período quente (setembro – fevereiro), evidenciando, de modo geral, o modelo conceitual discutido anteriormente, das armadilhas para a captura do ar quente, conforme proposto por Cigna (1967) e outros para outras cavernas. Quanto às temperaturas mínimas, estas são menos elevadas no período quente (setembro – fevereiro) nas estações dentro da caverna, corroborando novamente o modelo em questão. Ainda sobre as mínimas, percebe-se nos meses mais frios a existência de influências da temperatura externa nas estações Boca, Rio I, Rio II, Fafá e Rio III, estabelecendo, assim, limites preliminares para as trocas atmosféricas entre o meio externo e o meio interno, ao menos em intensidades mais elevadas. Esta circulação

majoritária gera níveis periféricos de troca com o restante da caverna, conforme já observado por meio dos coeficientes de correlação das Tabelas 8.1 a 8.3.

Além dos coeficientes de correlação, no caso dos meses mais quentes, pode-se também utilizar como material de apoio os perfis espaço-temporais para a temperatura do ar e a pressão atmosférica. Estes dois atributos espeleoclimáticos são mencionados por Cigna (1967) como causas estáticas da circulação do ar em cavernas. Na caverna de Santana, ambos apresentaram grande potencial cumulativo, em direção ao interior da cavidade e às galerias superiores. No caso da temperatura, este padrão foi sensivelmente mais evidente no perfil de abril/2010 (Figura 7.101), época habitual de meia estação (outono), mas que já apresentava temperaturas baixas no ano de 2010, na casa dos 18 °C. Destaque para o acúmulo térmico na galeria do rio Verde no perfil da Figura 7.101, sendo esta uma galeria confinada, superior e relativamente próxima ao meio externo. Neste mesmo perfil, a pressão atmosférica era maior fora do que dentro da caverna (Figura 7.105), contribuindo para a entrada de ar em seu interior. No perfil de janeiro/2011 (Figura 7.102), em pleno verão, também foi identificado acúmulo térmico nas galerias superiores, mas de forma mais uniforme, englobando toda a rede rio Verde – Cristo – Discos – Aranhas – São Paulo e São Jorge. O acúmulo de CO₂ (Figuras 7.108 e 7.109), em linhas gerais, seguiu o mesmo padrão cumulativo da temperatura do ar.

Assim, com as interpretações dos dados obtidos, em conjunto com as aferições de fluxos de ar realizadas, a Figura 8.4 sintetiza um modelo de circulação atmosférica para a porção estudada da caverna de Santana. Em seguida, a Figura 8.5 apresenta um detalhamento da classificação sob outro aspecto, focando nos limites aproximados das possíveis zonas climáticas e nos padrões sazonais dos valores de temperatura do ar para trechos específicos da caverna. Além disso, as Figuras 8.4 e 8.5 foram sintetizadas em um único material (APÊNDICE B), preparado para a apresentação dos dados básicos da circulação atmosférica da caverna de Santana e impactos no espeleoclima para o uso de professores e monitores ambientais locais.

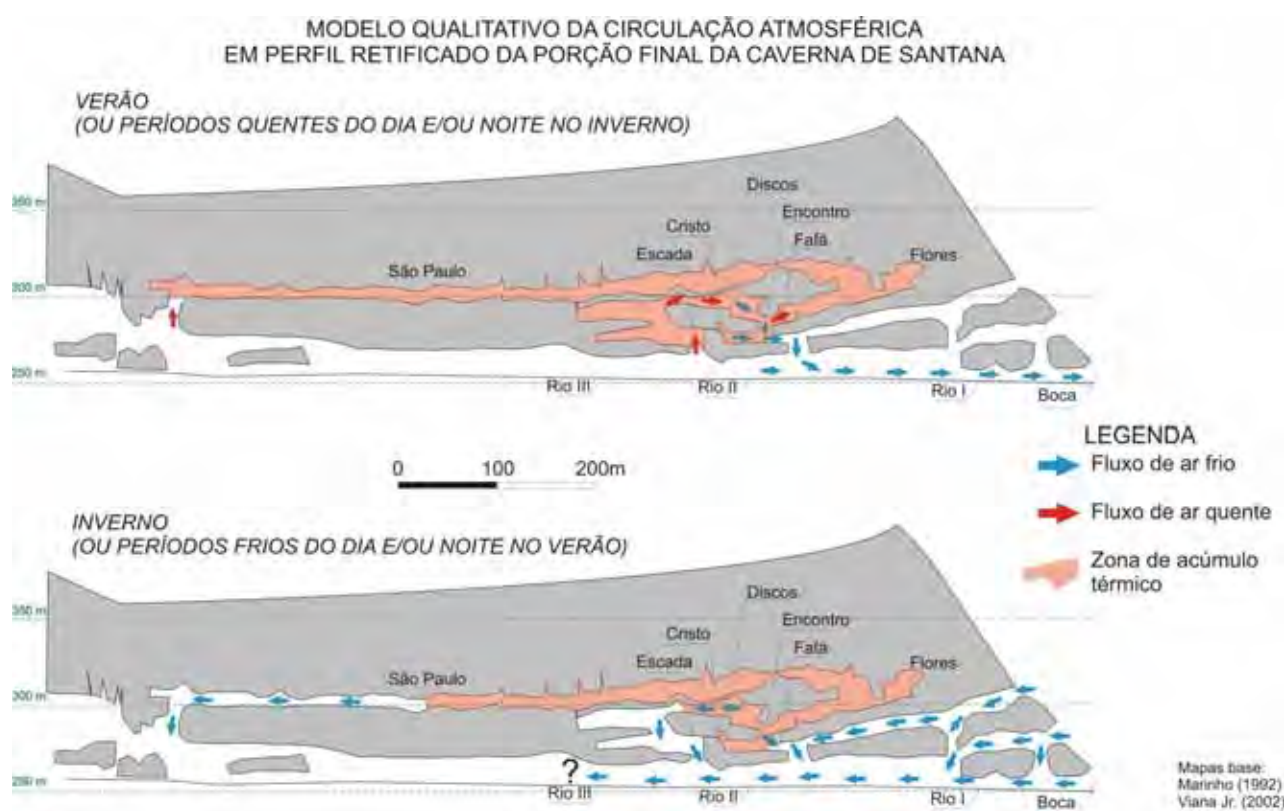


Figura 8.4 – Modelo conceitual de circulação de ar em corte longitudinal parcial da caverna de Santana, caracterizando-a como uma armadilha para a captura do ar quente (*warm trap*)

ZONAS CLIMÁTICAS (HIGROTÉRMICAS) DA PORÇÃO FINAL DA CAVERNA DE SANTANA, REPRESENTADAS EM PERFIL RETIFICADO



VALORES HABITUAIS DA TEMPERATURA DO AR*								
	Externa		Boca		Bolo de Noiva		Galeria do Rio (após o circuito turístico)	
	Set.-Fev. (+ chuvoso)	Mar.-Ago. (- chuvoso)	Set.-Fev. (+ chuvoso)	Mar.-Ago. (- chuvoso)	Set.-Fev. (+ chuvoso)	Mar.-Ago. (- chuvoso)	Set.-Fev. (+ chuvoso)	Mar.-Ago. (- chuvoso)
Temp. (°C)	22,4	17,9	20,3	21,2	19,2	19,2	18,1	19,1
	Fafá		Cristo		Encontro		Discos	
	Set.-Fev. (+ chuvoso)	Mar.-Ago. (- chuvoso)	Set.-Fev. (+ chuvoso)	Mar.-Ago. (- chuvoso)	Set.-Fev. (+ chuvoso)	Mar.-Ago. (- chuvoso)	Set.-Fev. (+ chuvoso)	Mar.-Ago. (- chuvoso)
Temp. (°C)	19,3	19,1	19,1	19,7	18,2	18,7	19,3	19,5

*Considerando o período entre abril de 2009 e março de 2010.

Figura 8.5 – Limites aproximados e valores habituais de temperatura do ar para diversos trechos da caverna de Santana

Conforme observado na Figura 8.5, a variação na temperatura do ar na caverna de Santana é escalonada em diferentes níveis, o que já foi demonstrado por meio de dados no Capítulo 7, durante a apresentação dos resultados. Com isso, são confirmadas, ainda que grosseiramente, as zonas termoclimáticas propostas na fase inicial da pesquisa, publicadas em Lobo et al. (2009a), sendo ampliadas para zonas climáticas, considerando as análises feitas no Capítulo 7 para a umidade relativa do ar. A Figura 8.5 evidencia também a existência de barreiras físicas no ambiente, que foram interpretadas como fatores-chave para a delimitação destas zonas – embora outros aspectos, como a distância em relação aos acessos externos, a conformação fisiográfica geral do ambiente, a presença de água, as dimensões das galerias e a distância em relação à superfície, também sejam decisivos na estratificação térmica da atmosfera de uma caverna (cf. GEIGER, 1951; POULSON; WHITE, 1969; BAKER; GENTY, 1998; TARHULE-LIPS; FORD, 1998; LUETSCHER; JEANNIN, 2004; BADINO, 2009a).

Na caverna de Santana, as barreiras físicas para a circulação de ar são evidentes, como é o caso: do conjunto de espeleotemas conhecido como “Bolo de Noiva” na galeria do rio Roncador; dos níveis de galeria – que como demonstrado na Figura 8.4, conservam o ar quente nos estratos superiores –; e das galerias restritas, como o salão das Flores, cuja passagem foi aberta artificialmente em meio às rochas e espeleotemas. Existem também barreiras físicas secundárias, como por exemplo, aquela que separa os salões São Paulo e São Jorge. Todavia, o enfoque da presente pesquisa não foi direcionado para identificar a existência de zonas distintas nestes casos – embora tenha detectado indícios de que possuam sutis diferenças em sua dinâmica atmosférica.

A determinação do padrão de circulação atmosférica de uma caverna é de fundamental importância para aferição do impacto negativo da presença humana durante a sua visita e na determinação de sua capacidade de carga. Nos fatores atmosféricos, isto se aplica tanto para a dissipação de ondas de calor – tal como já observado no trabalho de Lobo; Zago (2010) na gruta do Penhasco, em Buritinópolis-GO –, quanto para a compreensão de padrões de acúmulo de CO₂, como mencionam Bourges et al. (2001), Fernández-Cortés et al. (2006b) e Liñán et al. (2008). Este último parâmetro apresentou substanciais diferenças nos padrões de acúmulo dos perfis sazonais (ver Figuras 7.108 e 7.109).

O estado de equilíbrio termodinâmico em cavernas se explica em função da existência de fatores reguladores de fluxo em longo prazo, como a temperatura da rocha e da água. Estes atuam como tamponadores térmicos, regulando as variações no curto prazo e atenuando as alterações diuturnas. Para a caverna de Santana, as estatísticas descritivas destas variáveis são exibidas na Tabela 8.4.

Tabela 8.4 – Medidas estatísticas das séries anuais de temperatura da água (rio Roncador) e da superfície de rocha (salão do Encontro)

Medida Estatística	Temp. Água	Temp. sup. de rocha
Máxima (anual)	19,3 °C	19,3 °C
Mínima (anual)	17,1 °C	17,1 °C
Média (anual)	18,66 °C	18,29 °C
Amplitude (anual)	2,2 °C	2,2 °C

Nos trabalhos de Cigna (2004) e Stoeva; Stoev (2005) é ressaltado que a temperatura do ar no interior de uma caverna se encontra em equilíbrio com a temperatura da rocha e da água. Na caverna de Santana (Tabela 8.4), os valores máximos, mínimos e, por consequência, a amplitude térmica, são os mesmos para a água do rio (que se localiza no 5° nível de galerias) e a superfície rochosa em um ponto no salão do Encontro (4° nível de galerias). Considerando os coeficientes de correlação entre as séries apresentados na Tabela 7.5, nota-se a existência de correlação direta entre ambas, com índice r de 0,416.

A temperatura da água possui um índice igualmente elevado de correlação com as estações Externa (0,601), Boca (0,509), Rio I (0,487), Rio II (0,506), Fafá (0,516) e Rio III (0,422), o que demonstra que carrega influência do meio externo e, conseqüentemente, também influencia relativamente na atmosfera da caverna, tal como descrevem Badino (2004) e Stoeva; Stoev (2005). Embora em escalas de variabilidade distintas, a temperatura da água possui elevada correlação com o meio externo. A correlação cruzada entre as séries Externa e Rio III água foi de 0,641, com uma defasagem de 105h, a qual pode ter relação com o tempo percorrido pela água no interior do sistema, entre o sumidouro – na gruta das Pérolas, à quilômetros acima – e o ponto monitorado, que se localiza a menos de 300 m da ressurgência. Por outro lado, pode também ser explicada pela maior capacidade térmica relativa da água em relação ao ar, conforme explica Badino (2004). Além disso, é provável que a água se resfrie ao entrar no sistema subterrâneo, em função da temperatura da rocha, a qual mantém um nível baixo de variação térmica, com grande memória

cumulativa da variação climática local e que governa os subsistemas térmicos subterrâneos, como afirmam os estudos de Pflitsch; Piasecki (2003). Este padrão de relação entre temperatura da água e da atmosfera foi detectado também na terceira fase da pesquisa, o que foi representado anteriormente na Tabela 7.9.

8.3. Impactos ambientais da presença humana no meio físico em cavernas

8.3.1. Impactos nas rochas e espeleotemas

Os impactos e danos físicos identificados na caverna de Santana não diferem, na escala macro de análise, daqueles registrados por estudos anteriores para outras cavernas. A desobstrução de passagens, a construção de estruturas e benfeitorias para facilitar o acesso e a quebra – proposital ou acidental – de espeleotemas, são fatores que já haviam sido reportados anteriormente, tanto em escala mundial (CIGNA; BURRI, 2000; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006a, entre outros) quanto para a caverna de Santana (SCALEANTE, 2003; LOBO, 2005, como exemplos).

Em uma escala de maior detalhe, dois aspectos são fundamentais para a discussão dos impactos do espeleoturismo na caverna de Santana. O primeiro deles versa sobre o uso das carbureteiras, e suas possíveis consequências. Se os impactos das carbureteiras já foram estudados e comprovados no aspecto térmico (SCALEANTE, 2003; LOBO; ZAGO, 2010), pairavam questões ainda não respondidas sobre a deposição de fuligem (humo) liberada na queima do acetileno e problemas ambientais decorrentes. Se as análises no MEV não foram suficientes para comprovar a deposição do humo nos espeleotemas, as análises químicas não deixaram dúvidas, face aos teores de C encontrados, da ordem de 0,4 – 0,5%.

O segundo aspecto remete aos impactos físicos na microtopografia dos espeleotemas. Diversos danos foram identificados nas amostras coletadas no circuito de visitação, como corpos estranhos, biofilmes, desagregação mecânica e mesmo indícios de corrosão química. Tais resultados são semelhantes aos identificados no estudo de Pulido-Bosch et al. (1997) em uma caverna espanhola, e podem ser atribuídos à visitação. Faimon et al. (2006) acrescentam também que tais problemas, entre outros de cunho atmosférico, são comuns em cavernas densamente visitadas.

Por outro lado, os resultados das análises em MEV da amostra retirada de uma área não visitável diferem do estudo de Pulido-Bosch et al. (1997), por apresentarem elevada corrosão em superfície. Neste caso, a corrosão não foi

atribuída à visitação, mas a um processo natural desencadeado pela condensação, considerando a constante saturação hídrica e os elevados teores de CO₂ atmosférico encontrados da caverna de Santana.

A constatação destes impactos físicos pouco contribui para a capacidade de carga, dado que não foi possível estabelecer uma relação entre volume de visitação e intensidade do impacto nos espeleotemas. Teoricamente, mesmo a presença de um único visitante poderia causar diversos dos impactos registrados. Assim, tais análises remetem à delimitação de circuitos de visitação, tendo em vista a necessidade de deixar áreas significativas de uma caverna isoladas do uso público, tal como sugerido no trabalho de Fernández-Cortés et al. (2006c).

Quanto aos impactos decorrentes das alterações atmosféricas, a Figura 8.6 apresenta registros da segunda fase da pesquisa, no salão do Encontro.

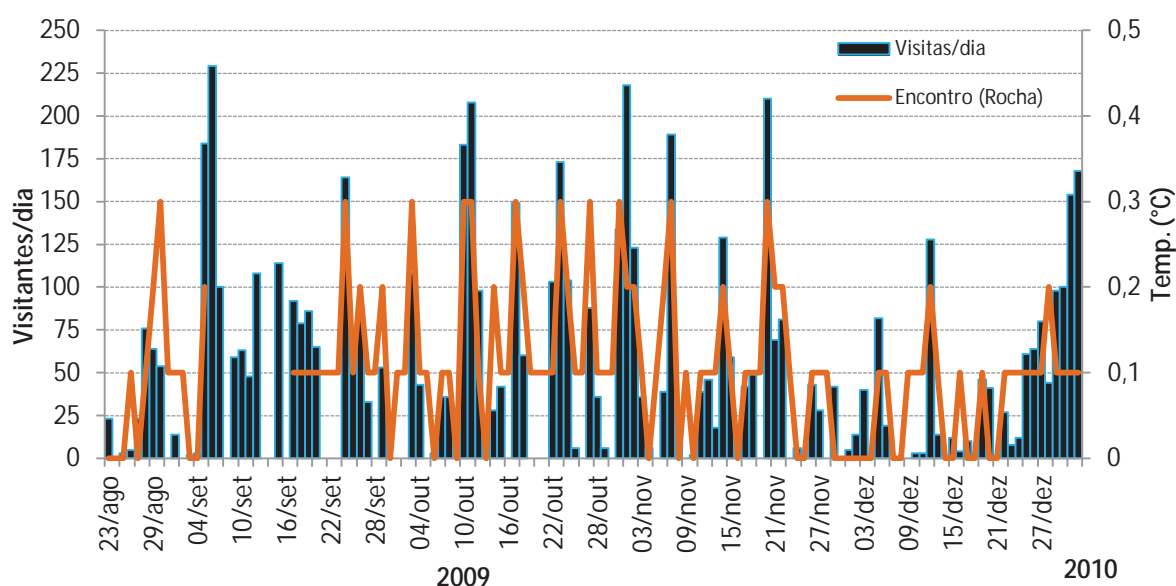


Figura 8.6 – Amplitudes diárias da temperatura da rocha na estação Encontro e sua relação com a visitação

A amplitude diária predominante no ponto monitorado da rocha no salão do Encontro foi de 0,1 °C, embora não tenha apresentado nenhuma variação cíclica em diversos dias. Isto também ocorreu com a presença de turistas, em 22,8% dos dias, em volumes diários de até 42 pessoas. A amplitude em dias de visitação não superou os 0,3 °C, embora tenha se situado na casa de 0,1 °C na maioria dos eventos (47,8%). As variações da ordem de 0,2 °C e 0,3 °C atingiram, respectivamente, 16,3% e 11,9% dos dias monitorados. Para uma visualização mais

detalhada da provável correlação existente, a Figura 8.7 exibe um gráfico da entrada de visitantes e da variação na temperatura da rocha.

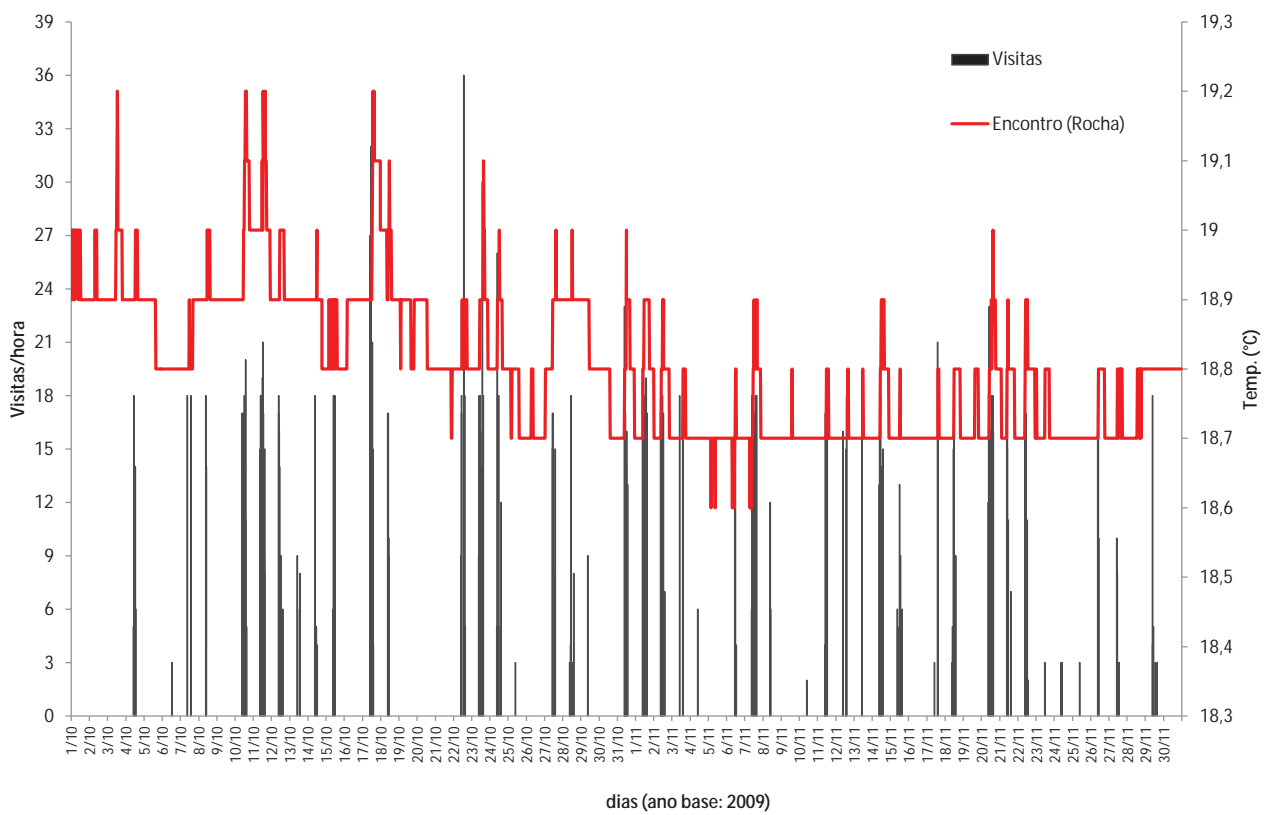


Figura 8.7 – Temperatura da rocha entre os dias 1º de outubro e 30 de novembro de 2009 na estação Encontro e sua relação com a visitação

A relação entre a visitação na caverna de Santana e o aumento na temperatura da superfície das rochas se confirma na correlação visual nas Figuras 8.6 e 8.7. A análise estatística descritiva de autocorrelação resultou em um coeficiente máximo de 0,267, com defasagem de 5h. O intervalo é coerente tanto em função do tempo despendido pelos visitantes entre a entrada na caverna e a passagem pelo salão do Encontro, quanto pela densidade relativa da rocha, que atenua no tempo e na intensidade das variações na temperatura. Enquanto no ar a variação atinge a ordem de $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ – com um valor excepcional de $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ –, na rocha esta amplitude não ultrapassa os $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. No entanto, a densidade da rocha também leva a uma retenção maior do calor recebido, o que resulta em maior tempo para retorno à temperatura habitual. Na série da Figura 8.8, o tempo de estabilização foi de aproximadamente 10h, com alguns episódios excepcionais na série.

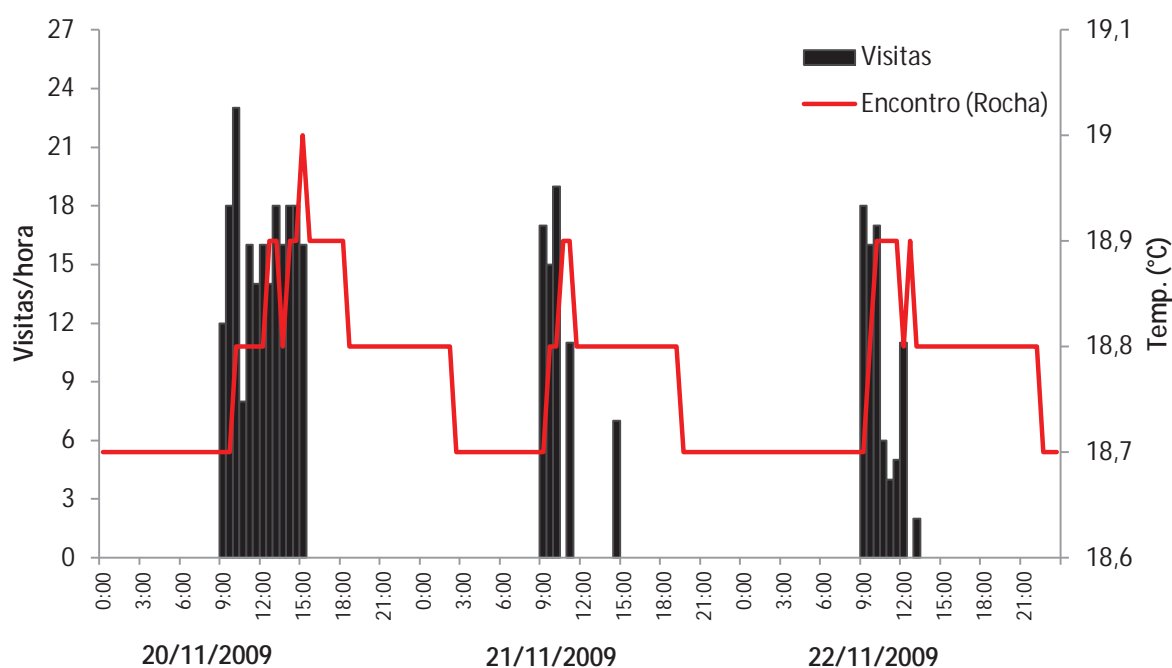


Figura 8.8 – Série de detalhe da temperatura da rocha entre os dias 20 e 22 de novembro de 2009 na estação Encontro e sua relação com a visitação

No dia 20 de novembro, a estabilização da temperatura da rocha (Figura 8.8) demorou quase 18h. Este dado permite questionamentos sobre impactos pontuais de maior intensidade na temperatura da superfície rochosa, os quais poderiam perdurar por ainda mais tempo, gerando impactos cumulativos no ambiente.

A existência de impactos térmicos na rocha em função da visitação já é conhecida, tendo sido identificada em trabalhos como os de Hoyos et al. (1998),

Sánchez-Moral et al. (1999), Carrasco et al. (2002) e Fernández-Cortés et al. (2006a). Em todos os casos, a intensidade dos impactos nas rochas é menor do que no ar e a estabilização ocorre em poucas horas.

Na caverna de Santana, episódios de acúmulo térmico foram observados nos períodos: 10 à 15; 15 à 18; e 27 à 30 de outubro de 2009. Situações como esta foram descritas por Song et al. (2000) na caverna Bayun, China, mas apenas para o CO₂. Infelizmente, a perda do registro na terceira fase não permitiu a confirmação destes dados, mantendo, por cautela, estes impactos mais intensos no campo hipotético – apesar da existência de registros. Neste caso, espera-se que pesquisas futuras possam aprofundar esta questão e obter respostas mais precisas sobre os impactos da presença humana na temperatura das rochas.

Desta forma, permanecem algumas dúvidas acerca da geração de impactos térmicos sobre os espeleotemas. Uma ampliação na variação da temperatura do ar aumentaria também o volume de condensação da água disponível no ar, em função do choque térmico (TARHULE-LIPS; FORD, 1998; DREYBRODT et al., 2005). Muito embora as paredes da caverna de Santana, em grande parte da área pesquisada, permaneçam constantemente úmidas pela própria água de percolação e pela evaporação da água do rio, este caso suscita questionamentos em função de se tratar de um processo de condensação induzida pela presença humana, tal como observado no trabalho de Fernández-Cortés et al. (2006a). Os autores demonstraram que o aumento na temperatura da superfície de rocha em conjunto com a condensação gera interferências de ordem físico-química em alguns espeleotemas, em especial nos minerais relativamente mais solúveis.

Alie-se a isto o fato de que a respiração libera umidade e CO₂ no ambiente. Então, em tese, produz-se uma reação entre a água disponível no ar e o CO₂ da respiração, o que levaria ao aumento da condensação de uma solução de ácido carbônico (H₂CO₃), ao invés de água (HOYOS et al., 1998; SÁNCHEZ-MORAL et al., 1999). Isto potencializa ainda mais a corrosão química, tal como observaram Sánchez-Moral et al. (1999) na caverna de Altamira, Espanha. Os autores demonstraram que a presença humana na caverna levou a um nível de corrosão por condensação 78 vezes superior em relação à dinâmica natural do ambiente.

8.3.2. Impactos na atmosfera subterrânea

A alteração dos parâmetros físico-químicos elementares da atmosfera subterrânea foi amplamente pesquisada em trabalhos anteriores, servindo como premissa de trabalho. Em alguns casos a presença humana é evitada totalmente, como nos abrigos fechados de pinturas rupestres frágeis – como a gruta de Lascaux, na França (BASTIAN; ALABOUVETTE, 2009) – ou depósitos químicos secundários instáveis – como no geodo de Pulpí, na Espanha (FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006c), já que as alterações atmosféricas podem gerar danos irreversíveis às pinturas e às rochas que as suportam, ou aos minerais de cavernas. Nos demais casos, a presença humana pode ser tolerada, sendo o desafio a identificação do limite de tolerância para a sua frequência e permanência, para resguardar a geo e a bioconservação subterrâneas.

Na caverna de Santana, ao menos no circuito tradicional, não existem pinturas rupestres, nem tampouco formações de minerais raros que justifiquem, *a priori*, a adoção de um controle inflexível e limitação do número de visitas calcado somente em princípios de precaução, dadas as dimensões da cavidade e a sua infra-estrutura interna. O desafio consiste em identificar quais os limites aceitáveis de variação dos parâmetros atmosféricos principais, de forma a compreender melhor a dinâmica do ambiente e, se possível, gerar modelos de mitigação de impactos que permitam verificar se as quantidades de visitas realizadas são adequadas para o ambiente.

Nesse sentido, inicialmente optou-se pela análise em separado dos parâmetros aferidos e das estações de monitoramento. Sobre o monitoramento do CO₂ no salão do Cristo, os picos registrados também coincidiram com picos de temperatura do ar. Além disso, conforme já demonstrado na Figura 7.98, existe correlação direta – em amplitude e tempo de estabilização – entre os picos de CO₂ nas estações Bacon e Cristo. Porém, cabe ressaltar que os picos registrados foram inferiores a 100 ppm, muito abaixo dos valores identificados em pesquisas como as de Sánchez-Moral et al. (1999), que chegaram a 500 ppm em função da visitação.

Teoricamente, os valores atingidos nos picos de CO₂ não ultrapassaram os limites de segurança para o ambiente. Dragovitch; Grose (1990) apontam que a corrosão de espeleotemas ocorre em concentrações acima de 2400 ppm. Na caverna de Santana, os valores máximos atingidos em momentos de pico nos pontos aferidos são de uma grandeza 50% menor. Por outro lado, Sánchez-Moral et

al. (1999) demonstraram que uma variação antrópica de 500 ppm foi suficiente para induzir o aumento da corrosão por condensação, sem, no entanto, apontar uma relação direta com um limite mínimo de saturação de CO₂ na atmosfera subterrânea. De igual modo, Hoyos et al. (1998) demonstraram teoricamente o aumento da dissolução da calcita, de 72,19 mg em condições habituais para 77,48 mg com a presença de visitantes, para uma ampliação de apenas 110 ppm de CO₂.

Outro aspecto importante é a ocorrência de variação térmica em conjunto como o acréscimo de CO₂. Tarhule-Lips; Ford, (1998) James (2004c) e Dreybrodt et al. (2005) apontam para um aumento potencial da corrosão por condensação quando da existência de um gradiente térmico. Com base em valores apontados por Dreybrodt et al. (2005), a existência de variações diárias de temperatura da ordem de 1 °C – tal como constatado, por exemplo, nos salões do Cristo e do Encontro – pode induzir taxas de corrosão da ordem de 0,3 µm/ano na rocha.

Faimon et al. (2006) acrescentam ainda que a deposição e dissolução de carbonatos são processos que ocorrem concomitantemente nas cavernas, de forma contínua. Os autores concluíram que os problemas induzidos de corrosão por condensação podem ocorrer em função de fatores como: grupos grandes de visitantes; maior tempo de permanência na caverna; e pré-existência de níveis elevados de CO₂ no ambiente. Estas informações podem subsidiar o processo de gestão do turismo na caverna de Santana.

No caso da temperatura, os dados registrados foram trabalhados considerando a amplitude térmica diária. Esta opção foi baseada nos trabalhos de Hoyos et al. (1998), Sánchez-Moral et al. (1999), Calaforra et al. (2003) e Fernández-Cortés et al. (2006a), que identificaram as variações de ordem natural nos ambientes pesquisados para correlacioná-los diretamente com a visitação e, a partir disto, estabelecer um limite diário de uso. Para a presente pesquisa, partiu-se da premissa que, na ausência de fragilidades ambientais intolerantes a alterações extremas, esta forma de determinar a capacidade de carga de um ambiente é sobretudo restritiva, por não considerar a sua dinâmica de equilíbrio.

Assim, foram calculadas as amplitudes térmicas diárias nas estações Cristo e Encontro, para os períodos entre 23 de agosto/2009 à 1º de janeiro/2010 e 1º de julho/2010 à 14 de setembro/2010 (este último apenas para a estação Cristo), considerando também os dados disponíveis de visitas diárias. Os resultados para a temperatura do ar são exibidos na Figura 8.9.

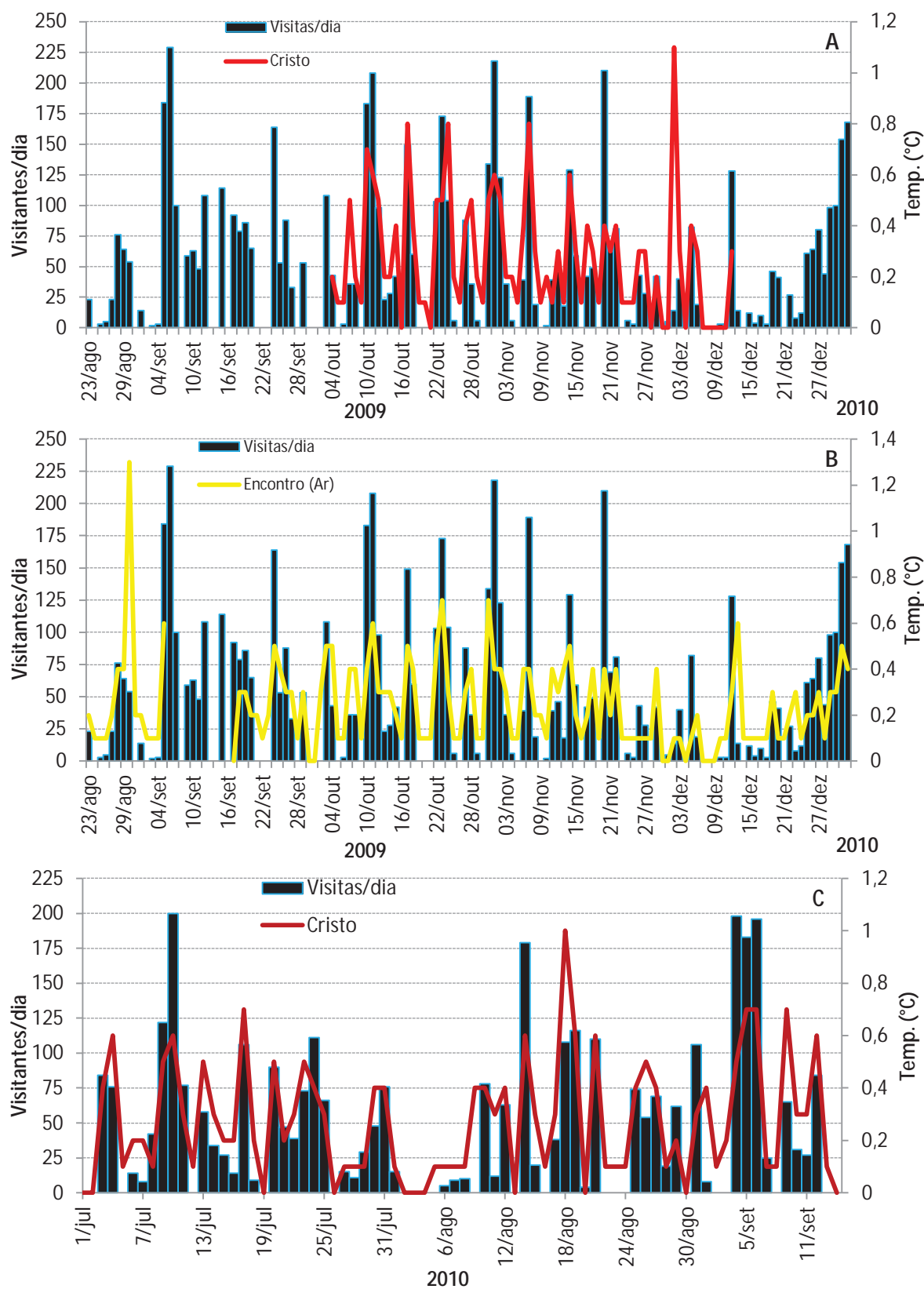


Figura 8.9 – Amplitudes diárias da temperatura do ar nas estações Cristo (A) e Encontro (B) no primeiro período e Cristo (C) no segundo período, e sua relação com a visitação

Os gráficos da Figura 8.8 evidenciam a correlação entre a visitação e o aumento da amplitude térmica diária. Para uma investigação comparativa, recorreu-se à análise estatística separada dos dias com e sem visitação (Tabelas 8.5 e 8.6).

Tabela 8.5 – Amplitudes diárias (temp. do ar) e presença de visitantes no salão do Cristo

Amplitude Diária (°C)	Cristo			
	Ocorrências		Número de visitantes	
	S/visit.	C/visit.	Mínimo	Máximo
0	18	4	3	5
0,1	21	15	3	42
0,2	1	17	2	62
0,3	-	20	12	128
0,4	1	17	8	210
0,5	-	13	36	198
0,6	-	9	76	218
0,7	-	5	65	196
0,8	-	3	104	189
1,0	-	1	108	108
1,1	-	1	14	14

Tabela 8.6 – Amplitudes diárias (temp. do ar) e presença de visitantes no salão do Encontro

Amplitude Diária (°C)	Encontro (Ar)			
	Ocorrências		Número de visitantes	
	S/visit.	C/visit.	Mínimo	Máximo
0	8	3	5	92
0,1	19	26	2	82
0,2	4	13	14	69
0,3	1	18	8	128
0,4	-	19	18	218
0,5	-	8	43	164
0,6	-	3	14	208
0,7	-	2	134	173
1,3	-	1	54	54

Em uma primeira leitura, as Tabelas 8.5 e 8.6 poderiam fornecer os subsídios necessários para a obtenção da capacidade de carga para a caverna de Santana. Para os salões do Cristo e do Encontro, a amplitude diária predominante, sem a presença de visitantes, é de 0,1 °C. A presença de visitantes gerou amplitudes diárias máximas de 1,1 °C (Cristo) e 1,3 °C (Encontro), embora os valores predominantes sejam na faixa de 0,1-0,5 °C (Cristo) e de 0,1-0,4 °C (Encontro). Estas excitações nos valores foram geradas por grupos de dimensões bastante

variáveis, sendo que no Cristo, apenas duas pessoas foram suficientes para atingir a amplitude diária de 0,2 °C, 12 pessoas para 0,3 °C e 8 pessoas para 0,4 °C. Apesar de ter sido registrada amplitude de 0,4 °C sem a presença de visitantes neste salão, é preciso suspeitar da passagem de pessoas para fins de pesquisa/fiscalização neste dia, o que nem sempre é registrado nas fichas de controle de visitação. No Encontro, a presença de duas pessoas gerou amplitude de 0,1°C, e a presença de 18 pessoas ampliou este valor para 0,4 °C.

Neste caso, dois caminhos poderiam ser preliminarmente pensados para a definição da capacidade de carga. No primeiro deles, admitindo-se que: a) as variações de ordem antrópica não devem exceder as variações naturais (HOYOS et al., 1998; CALAFORRA et al., 2003); e b) a capacidade de carga deve se basear na temperatura, por ser o fator crítico em função da resposta imediata frente à presença humana (CIGNA; FORTI, 1988); o limite de visitantes seria de uma pessoa no salão do Cristo – considerando que, com duas pessoas, já houve amplitude de 0,2 °C registrada – e de 13 pessoas no salão do Encontro, já que 14 pessoas geraram, em tese, calor suficiente para suplantar a amplitude habitual de 0,1 °C.

Todavia, mesmo com a passagem de 92 pessoas em um único dia, não houve alteração na temperatura do ar no salão do Encontro (Tabela 8.6), o que demonstra que a aplicação desta forma de se pensar a capacidade de carga é equivocada para uma caverna com dinâmica atmosférica tal como a da Santana. Isto porque não há linearidade nos dados, dado que um grupo de apenas 14 pessoas gerou uma amplitude diária de 1,1 °C no salão do Cristo, enquanto que 210 pessoas, divididas em diversos grupos diários, causaram uma amplitude diária de 0,4 °C. Disso, subtrai-se a conclusão preliminar que o aumento da temperatura tenha ligação direta com o tempo de permanência nos salões, e não com a quantidade de pessoas em cada grupo. Tal hipótese se baseia no costume que os guias têm de apresentar um espeleotema ao fundo de uma pequena galeria que tem a forma alegada da face de Jesus Cristo, o que dá o nome do salão. Para esta observação, um visitante se desloca por vez para efetuar a referida visualização, enquanto os demais visitantes do grupo ficam parados no salão, a espera de sua vez para a observação. No salão do Encontro, onde também se observou comportamento anômalo da temperatura, existe o costume de se agrupar os visitantes, para que seja feita a experiência de apagar todas as luzes, para vivenciar a escuridão total que caracteriza o ambiente cavernícola.

Em uma segunda aproximação, poderia se determinar a capacidade de carga pelo método de Cifuentes-Arias et al. (1999). Neste, as situações-problema identificadas em um diagnóstico do ambiente são transformadas em um coeficiente de redução, que limita proporcionalmente um valor inicial de visitantes proposto em função de uma lógica espaço-temporal. Na maioria dos casos, estes coeficientes se traduzem em questões espaciais, como por exemplo, o tamanho do trecho sujeito à compactação do solo em razão do tamanho total do percurso. Em alguns casos, as questões temporais também são aplicadas, como o total de dias com chuva em razão do total de dias em que um atrativo está aberto ao uso.

Para a caverna de Santana, a capacidade de carga já havia sido calculada pelo método acima mencionado, nos trabalhos de Lobo (2005, 2008b), mas sem o uso da temperatura do ar. Neste caso, a capacidade de carga física – ou limite espaço-temporal – calculada para o roteiro turístico da caverna de Santana é de 2918 visitas/dia. A este valor, se aplicam os fatores de correção identificados, ora nomeados como FC_{Tcr} (Fator de correção temperatura do ar no salão do Cristo) e FC_{Ten} (fator de correção temperatura do ar no salão Encontro). O cálculo destes FCs é feito a partir da Equação 8.1:

$$FC_x = 1 - \left(\frac{Mlx}{Mtx} \right) \quad (8.1)$$

Onde o fator de correção “x” da capacidade de carga física é uma razão da magnitude limitante do problema – Mlx – em relação à sua magnitude total – Mtx . Para a caverna de Santana, a Mtx seria a amplitude térmica diária em condições naturais em cada uma das estações, enquanto que a Mlx seria a amplitude diária com visitação que não atinge a magnitude total. Assim, os FCs obtidos seriam:

$$FC_{Tcr} = 1 - \left(\frac{0,1}{0,1} \right) = 0 \text{ (zero)}$$

$$FC_{Ten} = 1 - \left(\frac{0,2}{0,3} \right) = 0,33 \text{ (33\%)}$$

Estes coeficientes são multiplicados pela capacidade de carga física, resultando em 962 visitas/dia ao considerar o FC_{Ten} , mas se reduzindo à zero em função do FC_{Tcr} . Neste caso, um problema fundamental seria gerado, por indicar a incompatibilidade da visitação com a conservação do ambiente, em função do limite zero de variação adotado. Uma alternativa seria retirar o salão do Cristo do circuito de visitação, eliminando completamente a situação-problema. Em ambos os casos, isto demonstra que o método de Cifuentes não se apresenta como um bom

indicador de quantidade de visitação quando da adoção de limites tão restritos de variabilidade aceitáveis.

Analisando os mesmos dados sob outro ângulo, a Figura 7.129 demonstrou em um breve teste que a temperatura do ar no salão do Cristo se restabelece em no máximo 8h após o início do impacto, enquanto que o tempo de restabelecimento do equilíbrio natural no salão do Encontro é de 7h. A mesma figura, em conjunto com as séries de dados coletadas, evidencia também que não há efeito cumulativo diário em função da visitação, de modo que a temperatura do ar, após receber o impacto, volta ao seu valor original, com variações mínimas de +- 0,1 °C em alguns casos.

8.4. Manejo do espeleoturismo com base em parâmetros determinantes do ambiente

O conhecimento da dinâmica espeleoclimática tem sido utilizado como a base e início para a discussão do manejo turístico de uma caverna, que em essência, transcende a pura e simples análise da atmosfera e suas características básicas. O aspecto fundamental da questão é o tipo de manejo pretendido, considerando a existência de duas possibilidades: o manejo do ambiente em função das necessidades dos visitantes; e o manejo dos visitantes em função das limitações do ambiente.

A primeira possibilidade, se praticada de forma irrestrita, remete às adaptações impostas ao ambiente subterrâneo, sob a justificativa de facilitar o acesso e concentrar os impactos da visitação. No passado, tentativas desastrosas foram executadas no Brasil e em outros países, onde se havia um excesso de modificações no ambiente e sua espetacularização. Na contemporaneidade, este tipo de manejo ainda pode ser aceito, desde que devidamente planejado e executado com princípios de mínimo impacto, tanto nas técnicas de construção quanto nos materiais eventualmente empregados. Neste caso, serve como complemento ao que preconiza a segunda forma de manejo espeleoturístico.

A segunda possibilidade de manejo coloca as prioridades de conservação do ambiente como determinantes para o tipo, intensidade e volume de atividades a serem desenvolvidos, bem como para as interferências no ambiente. Esta forma de desenvolvimento do espeleoturismo emergiu com mais força no Brasil a partir dos anos 1990, com a expansão do ecoturismo dentro dos ideários defendidos nas *Diretrizes Para Uma Política Nacional de Ecoturismo* (BRASIL, 1994). Por outro lado,

a questão já ganhava corpo no exterior antes mesmo desta data, se iniciando nos anos 1970 para o ecoturismo em geral (CEBALLOS-LASCURÁIN, 1996), e nos anos 1980 para o espeleoturismo (CIGNA; FORTI, 1988; CIGNA, 1993). Neste caso, a base para o desenvolvimento das atividades turísticas se assenta no conhecimento das características do ambiente, obtido por meio de diagnósticos ambientais, focados em dois aspectos: a) o conhecimento do meio subterrâneo; e b) a obtenção de respostas acerca dos possíveis impactos da visitação. Para tanto, devem ser feitas análises prévias ao uso turístico, sempre que possível, sendo acompanhadas de estudos de monitoramento. A partir destes dois aspectos, são traçados limites para o uso do ambiente, de acordo com as fragilidades identificadas.

Para a caverna de Santana, o seu desenvolvimento histórico enquanto produto turístico não corresponde a nenhum dos dois extremos citados. Em seu interior foram construídas infra-estruturas de acesso, mas não com o porte e nível de danos ambientais observados em outros casos mais extremos, como a caverna do Diabo (SP) ou a gruta Rei do Mato (MG), por exemplo. Outras alterações significativas também foram realizadas, como o corte de estalactites, abertura de passagens na rocha encaixante e construção de escadas de blocos rochosos rejuntados com argamassa. Estas estruturas não são totalmente agressivas ao ambiente, à exceção do impacto pontual no ponto de instalação, bem como de algumas decorrências para a biota cavernícola em função do uso de madeira para grande parte das infra-estruturas construídas.

Quanto à relação entre o ambiente e as limitações ao uso, ela foi colocada parcialmente em prática. Se por um lado, a visitação turística de algumas áreas da caverna nunca tenha sido permitida – como o complexo Taqueupa –, por outro lado o uso do circuito tradicional foi intensificado à medida da procura, sem a adoção prévia de um critério de limitação do acesso. Em meados de 2003, a caverna chegou a receber mais de 1000 visitantes em um único dia (LOBO, 2008b), o que era regido pelo aumento na demanda. Outro fator de agravo foi o uso indiscriminado de carbureteiras, o que gerava aumento excessivo na temperatura do ambiente, tal como constatado nos estudos de Scaleante (2003). Este mesmo autor levantou a hipótese de que as películas pretas que recobrem os espeleotemas seriam originadas na queima do acetileno das carbureteiras. Estes problemas, reais ou hipotéticos, passaram a ser resolvidos somente em tempos mais recentes, com a

proibição do uso de carbureteiras em meados de 2005 e a adoção dos primeiros limites de visitação em 2008.

No estudo de Lobo (2008b), foi estabelecida uma capacidade de carga para a caverna, com base no método de Cifuentes-Arias et al. (1999), a partir dos seguintes fatores: a relação espaço-tempo, que gerou um coeficiente de rotatividade para a caverna; os níveis de circulação de energia, em estudo qualitativo feito por Lobo; Zago (2007); e no chamado fator social, previsto no método de Cifuentes-Arias et al. (1999), mas que é extrínseco ao ambiente estudado. Com isto, chegou-se ao montante de 117 visitas diárias, o que inclui tanto turistas quanto os guias locais.

A necessidade de se desenvolver uma nova forma de obter um valor limite de visitas diárias se sustentou a partir dos aspectos mencionados, seja pela postura desejada de um espeleoturismo menos danoso, inserido na perspectiva do ecoturismo, seja pela falta de respostas objetivas, até o presente momento, sobre os limites de uso da caverna em função de suas características intrínsecas.

Cabe lembrar que outros métodos já foram desenvolvidos e testados em pesquisas e trabalhos anteriores, para fins de manejo de cavernas. No entanto, suas características básicas e objetivos diferem do que se busca para o caso da caverna de Santana. O método de Cifuentes-Arias et al. (1999) tem por base o uso cumulativo de situações-problema identificadas no ambiente, de forma a limitar uma proposta inicial obtida por meio de um coeficiente de rotatividade espaço-temporal. Esta somatória, dos chamados Fatores de Correção, impossibilita a identificação de nexos causais entre a presença de visitantes e a alteração nos parâmetros considerados, limitando demasiada e injustificadamente o uso de uma área natural. Em uma primeira análise a ideia parece adequada, considerando possíveis princípios de precaução. Por outro lado, deve-se ter em mente que as cavernas são ambientes frágeis, que se abertos ao uso público, devem ser utilizados dentro de uma faixa limite de tolerância – nem além, nem aquém desta – para que o benefício da visitação, quer para quem visita, quer para quem recebe os turistas, compense a eminência dos impactos no meio.

Em outra proposta de capacidade de carga, a existência de um fator crítico (CIGNA; FORTI, 1988) representado pela alta fragilidade do ambiente é tomada como parâmetro de controle para determinar o volume de visitação. Esta forma é frequentemente utilizada para proteger pinturas rupestres (HOYOS et al., 1998), as rochas que lhes dão suporte (SÁNCHEZ-MORAL et al., 1999) e depósitos

secundários de maior instabilidade química (FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006a) em cavernas. Outro bom exemplo é dado também no trabalho de Calaforra et al. (2003), que conduziram um experimento de visitação em uma caverna fechada ao turismo, para identificar as alterações atmosféricas ocorridas.

O ponto comum destes métodos é a limitação do número de pessoas em função de um limite zero na variação da amplitude e/ou do valor habitual da temperatura do ar ou das rochas. Mas os métodos apresentam limitações, pois como lembram Calaforra et al. (2003), a conclusão que se pode obter é sobre a quantidade de pessoas simultaneamente dentro da caverna – ou de um trecho dela, já que tais pesquisas foram feitas em cavidades pequenas. Outro aspecto importante a ser ressaltado é a limitação em função de uma suposta inexistência de impactos, o que é desejável em cavernas com fatores críticos de fragilidade. Mas na maioria dos casos, tais métodos podem gerar limitações demasiadas e injustificadas. Isto foi demonstrado na prática na seção anterior deste capítulo, em um cálculo hipotético da capacidade de carga da caverna de Santana com base em sua amplitude térmica diária.

Por outro lado, princípios modernos de manejo devem ser considerados, como os apresentados por Graefe et al. (1990) no método “Manejo dos Impactos do Visitante” (VIM)¹⁶, desenvolvido para trilhas, mas já utilizado no manejo de cavernas na Austrália (HAMILTON-SMITH, 1997) e Nova Zelândia (FREITAS, 2010). Este trabalho parte da constatação de que é impossível a existência de atividade antrópica sem nenhuma alteração ao ambiente. Outra questão a ser considerada é a sazonalidade da capacidade de carga, conceito já empregado no trabalho de Lario; Soler (2010) e relatado por Freitas (2010) para a caverna Glowworm, na Nova Zelândia. Se as variações dos parâmetros ambientais mudam em ciclos temporais, é possível que as respostas aos estímulos realizados sejam distintas, gerando níveis diferenciados de limitação.

Partindo destas linhas de raciocínio, o que se buscou nesta pesquisa não foi a identificação de um nível de uso que não gere impactos, mas sim, que as alterações decorrentes da presença humana não sejam: a) persistentes no ambiente em longo intervalo de tempo, dado que nem todas as consequências da alteração de um determinado parâmetro ambiental são conhecidas; e/ou b) comprovadamente

¹⁶ *Visitor Impact Management*, no original em inglês.

danosas a algum aspecto do ambiente subterrâneo, quando este nível de conhecimento já for estabelecido.

A base lógica do processo desenvolvido se fundamentou nos mecanismos de estímulo-resposta já estudados nos trabalhos de Hoyos et al. (1998), Calaforra et al. (2003) e Fernández-Cortés et al. (2006a), entre outros. Sob a ótica do cruzamento das informações para a obtenção de limites de visitação, foi adotada a formulação de índices, tal como realizado por Cifuentes-Arias et al. (1999). Todavia, na presente pesquisa foi utilizado um enfoque diferenciado, de cunho temporal, ao invés de espacial.

O manejo do espeleoturismo se configura em um clássico problema de barganha, onde diferentes pontos de vista são confrontados entre si, visando à manutenção equilibrada dos ambientes envolvidos, o natural e o social. Para sua solução, é proposta uma metodologia que tira do enfoque as questões do espaço linear (CIFUENTES-ARIAS et al., 1999) e do limite zero de impactos (HOYOS et al., 1998, entre outros). A proposta se baseia nos limites de resiliência da dinâmica natural do sistema, ora considerados sobre um enfoque temporal. Com esta abordagem, pretende-se identificar limites de uso adequados às características do ambiente, que podem variar conforme a sazonalidade climática, e que devem ser posteriormente monitorados para sua validação e possíveis correções.

8.5. Capacidade de carga espeleoturística

A metodologia de capacidade de carga ora proposta é dividida nas seguintes etapas: I) delimitação preliminar do caminhamento e análise do fluxo de visitação; II) projeção do cenário de visitação desejado; III) análise de parâmetros ambientais para a identificação de fatores críticos sazonais; IV) transformação do fator crítico em índice de limitação; V) obtenção da capacidade de carga preliminar e ajustes no circuito de visitação, pela submissão do cenário projetado ao índice de limitação; VI) validação do resultado preliminar em função da sazonalidade espeleoclimática e consolidação da capacidade de carga para cavernas turísticas (CCC_T), ora denominada capacidade de carga espeleoturística para fins de simplificação; e VII) Monitoramento dos fatores críticos considerados.

Na sequência, cada uma das etapas será detalhada e explicada.

8.5.1. Delimitação preliminar do caminhamento e análise do fluxo de visitação

A capacidade de carga espeleoturística depende, inicialmente, de um fator de disponibilidade espacial. Trata-se de uma questão básica em qualquer tentativa de identificação de um limite de uso, pois é preciso considerar, no mínimo, o espaço disponível para o uso e o espaço necessário para o tipo de uso pretendido.

A delimitação do espaço subterrâneo poderia, a princípio, ser feita de duas formas: pelo zoneamento ambiental ou pela delimitação do caminhamento. Neste método, optou-se pela delimitação do caminhamento, por se tratar de medida mais efetiva de conservação do ambiente subterrâneo. É por meio dele que se resguarda o confinamento da maior parcela do impacto da visitação.

O caminhamento fixo já foi defendido em trabalhos anteriores no Brasil, publicados por Lino et al. (1984), Lobo (2006c, 2008b) e Boggiani et al. (2007). Outros trabalhos em escala mundial também se utilizaram do mesmo preceito, como Carranza et al. (2006) e Cigna (2010). A delimitação do caminhamento é originada em trilhas, para diminuição do efeito-borda e redução da abertura de trajetos paralelos em função de práticas desordenadas. Mas mesmo em caminhos sobre leitos rochosos, tal preceito é válido, pois a fragilidade dos depósitos químicos secundários, ou mesmo dos depósitos clásticos, é tão grande quanto a vegetação ciliar de uma trilha, posto que esta, ao contrário da maioria dos depósitos químicos, por exemplo, ainda pode se regenerar. Por outro lado, os depósitos químicos secundários, se pisoteados, são de difícil limpeza e recuperação.

A delimitação do caminhamento se divide na determinação do trajeto linear de percurso e na identificação das áreas de dispersão controlada, para a realização de paradas interpretativas, atividades de percepção sensorial ou interação com o ambiente. Tratam-se de pontos estratégicos, onde os visitantes têm a oportunidade de ampliar seu conhecimento e o contato com o ambiente. A ampliação do contato deve permear diversos aspectos, não se limitando aos sentidos de visão e audição – estimulados pela preleção de condutores de visitantes ou professores –, mas trabalhando também o tato, o olfato e, se possível, até mesmo o paladar. A extrapolação dos sentidos deve ser orientada por práticas planejadas e ordenadas, de forma a não submeter trechos demasiadamente vulneráveis do ambiente ao contato direto, por exemplo. Mas em determinados trechos de uma caverna, até mesmo o contato com o piso, as paredes e os espeleotemas pode ser considerado, desde que revestido de um propósito educativo e que realizado de forma orientada.

O trajeto de visitação deve ser determinado em função dos potenciais atrativos existentes na caverna, bem como das condições adequadas de acesso. Os métodos desenvolvidos por Lino (1988) e Lobo (2007) permitem uma avaliação preliminar destes aspectos. Além disso, o percurso proposto deve privilegiar as áreas menos susceptíveis aos impactos da visitação, que possuam níveis mais elevados de circulação de energia e massa e fluxos dispersivos em direção ao ambiente externo. Heaton (1986) acrescenta que diferentes níveis de fluxo energético são encontrados em uma mesma caverna, o que precisa ser considerado para, quando possível, optar por condutos e salões de atmosfera menos estável. Outra premissa importante é tornar os trajetos de visitação circulares, melhorando com isso o fluxo de visitação e, ao mesmo tempo, diminuindo potencialmente os impactos da presença humana.

De um modo geral, as áreas de maior circulação de energia e massa são mais propícias à visitação, por serem ambientes dispersivos. Por outro lado, Heaton (1986) e Cigna (1993) lembram que os principais atrativos, muitas vezes, se localizam nas áreas mais estáveis, que são ambientes cumulativos.

Sobre as áreas de dispersão controlada, deve-se adotar uma premissa de uso adequado do espaço subterrâneo, sem causar grandes aglomerações ou mesmo tumultos em função do excesso de pessoas em um espaço demasiadamente restrito. Assim, elas podem ser uma premissa de limitação do tamanho dos grupos, em função da área existente para a dispersão, em metros quadrados. Não foi identificado nenhum estudo objetivo sobre qual o tamanho mínimo por pessoa a ser considerado para este fim. Trabalhos em trilhas (e.g. CIFUENTES-ARIAS, 1992) apontam que cada pessoa ocupa 1 m linear, enquanto outros em praias (e.g. RUSCHMANN et al., 2008) mencionam valores variáveis entre 5 m² e mais de 20 m² para definir uma área adequada para o conforto do banhista, tendo sido adotado, no caso da Praia Brava, em Santa Catarina, um padrão de 10 m² por pessoa. Para Porto Seguro, BA, foi definido como padrão ideal um valor de 8 m² por usuário (SILVA et al., 2008), para se ter uma ideia de parâmetros em praias, onde uma área maior é necessária em função da prática de lazer realizada.

No caso da caverna de Santana, testes práticos feitos em campo durante esta pesquisa demonstraram que áreas com no mínimo 0,85 m² (1 m de largura e 0,85 m de comprimento) são suficientes para que um visitante permaneça em pé sem contato direto com as pessoas ao seu redor e sem aparente sensação de

desconforto, podendo ser tomado como parâmetro espacial mínimo. No entanto, pesquisas futuras devem também focar mais a fundo nas questões da sensação de conforto e fruição da visitação por parte dos visitantes, para definir de forma mais precisa este valor.

Por fim, devem ser feitos a medição do roteiro proposto e a execução de testes-piloto com grupos de visitantes, para identificar o tempo médio de visitação. Este tempo deve também levar em conta as possíveis paradas interpretativas. Tal aspecto é fundamental, pois é por meio dele que podem ser encontrados fatores limitadores da capacidade de carga espeleoturística. Assim, o tempo gasto em cada parada deve ser anotado à parte, além de ser contabilizado para o total do roteiro.

8.5.2. *Projeção do cenário de visitação desejado*

Após o conhecimento do roteiro, devem ser definidos os critérios para o dimensionamento do uso turístico. Em trabalhos anteriores, duas propostas distintas para este tipo de procedimento foram identificadas. Cifuentes-Arias et al. (1992, 1999) optaram por iniciar o dimensionamento da visitação por uma relação espaço-tempo, que pautada na seguinte questão:

- Quantas pessoas cabem em um determinado lugar em função de um intervalo de tempo pré-definido?

Estes autores remetem então a um coeficiente de rotatividade, estratégia muito comum para o dimensionamento de volumes de visitação em roteiros e equipamentos turísticos de larga escala de uso, como hotéis, restaurantes, salas de eventos, parques temáticos e outros. Além disso, a metodologia adota também o critério de espaçamento mínimo entre grupos, em metros lineares, o qual apresenta pouca utilidade prática, até mesmo pela dificuldade de controle.

Por outro lado, trabalhos como o de Hoyos et al. (1998), partem de uma premissa diferente. Estes autores se baseiam na possibilidade de obter do ambiente a informação sobre o limite ideal de uso antrópico, por meio da resposta aos estímulos realizados. Esta forma de obter um limite é bastante útil em algumas cavernas, onde um fator crítico do ambiente apresente intolerância à variação atmosférica que exceda a dinâmica natural do ambiente. Assim, se estabelece uma nova questão fundamental para a capacidade de carga:

- Quantas pessoas podem entrar em uma caverna sem impactar a sua dinâmica natural?

A resposta para esta questão é complexa e de difícil obtenção, muito embora alguns trabalhos (HOYOS et al., 1998; CALAFORRA et al., 2003) tenham demonstrado que a identificação deste limiar é possível. Todavia, a alteração na escala de análise e a seleção de quais parâmetros serão monitorados podem interferir significativamente nos resultados.

Para a metodologia ora proposta, a premissa inicial foi alterada, gerando um terceiro caminho, ao invés de se basear em coeficientes de rotatividade ou se limitar pela premissa quase utópica de geração de um nível zero de impactos. O ponto de partida passou a ser a projeção de um ou mais cenários desejáveis de visitação, elaborados por planejadores turísticos em conjunto com a gestão do recurso natural em foco, tal como já realizado em Lobo et al. (2010b). Neste caso, as expectativas de manejo do gestor são expostas de antemão, o que permite uma avaliação prévia das propostas de implantação do espeleoturismo. A experiência dos planejadores turísticos envolvidos na aplicação da metodologia é fundamental, pois permite que grandes discrepâncias sejam redimensionadas antecipadamente. O preceito básico desta projeção deve ser a sustentabilidade ambiental, agregada à relativa necessidade de geração de renda com a prática do espeleoturismo na caverna estudada. A capacidade de carga passa a ser delimitada como um teste de hipóteses, iniciado a partir daquilo que se espera enquanto volume de visitação de um roteiro espeleoturístico.

Desta forma, a projeção adequada de um cenário de visitação depende do conhecimento prévio dos seguintes fatores:

- a) Tempo de realização do percurso de visitação, em minutos;
- b) Tempo total em que o atrativo estará aberto ao uso, em minutos, já descontado o total de minutos da realização do trajeto. Isto porque o último grupo deve iniciar o roteiro com uma antecedência suficiente para que o término seja realizado antes do horário de fechamento para a visitação;
- c) Tamanho desejado dos grupos de visitantes, ou seja, a escala de visitação, que deve levar em conta, como recomendado por Lobo et al. (2010b), os seguintes fatores: o espaço disponível; as condições de segurança do roteiro; a disponibilidade de guias de turismo; a manutenção do sistema turístico local; o tipo de atividade a ser realizada.

Se por um lado estas informações – acrescidas do tamanho de percurso, que para efeito de cálculo no presente método, não é fundamental – permitiriam a

obtenção de um coeficiente de rotatividade nos moldes tradicionais, na presente proposta elas são mais focadas em determinar o montante desejado de visitas diárias para um determinado atrativo. Obtido este valor, pode-se conhecer o intervalo de tempo para a entrada dos grupos no roteiro, com base nas Equações 8.2 e 8.3:

$$Trv = Tt - Tv \quad (8.2)$$

$$Ie_H = \frac{Trv}{\frac{Cv}{Ev}} \quad (8.3)$$

Onde:

Trv = Tempo real de visitação;

Tt = Tempo total em que o atrativo está aberto ao uso (diferença entre o horário de fechamento e o horário de abertura), em minutos;

Tv = Tempo gasto para percorrer o roteiro de visitação, considerado a partir da saída do ponto de controle e retorno até o mesmo local, em minutos;

Ie_H = Intervalo de entrada hipotético dos grupos de pessoas no roteiro, em minutos;

Cv = Cenário de visitação desejado, ou seja, total diário de visitas; e

Ev = Escala de visitação, determinada pelo total de pessoas por grupo, o que inclui eventuais guias e outros acompanhantes que se façam necessários.

Ao término desta primeira etapa, é possível conhecer o intervalo de tempo entre os grupos, o que é fundamental para a análise de impactos no ambiente.

8.5.3. Análise de parâmetros ambientais para a identificação de fatores críticos sazonais

A realização de um estudo ambiental preliminar é ponto fundamental para conhecer os possíveis níveis de pressão que um determinado ambiente pode suportar. Isto permite a identificação dos fatores críticos (CIGNA; FORTI, 1988) e evita a ocorrência de danos naturalmente irreversíveis ao ambiente. Esta premissa foi aplicada em algumas cavernas na Europa, como mostram os trabalhos de Villar et al. (1984a), Calaforra et al. (2003) e Fernández-Cortés et al. (2006a). Este último recomendou que o geodo gigante de Pulpí, na Espanha, sequer fosse aberto a visitação, em função da resposta atmosférica exacerbada durante visitas-piloto, aliada à instabilidade físico-química dos cristais de selenita (gipsita).

A complexidade dos estudos atmosféricos para a identificação de fatores críticos deve ser proporcional ao nível de fragilidade do ambiente. Sob a ótica da geoconservação, deve-se atentar para a existência de pinturas rupestres, vestígios paleontológicos, espeleotemas frágeis, minerais raros e depósitos de gelo. Com base nos resultados da pesquisa realizada na caverna de Santana e nos dados secundários consultados, a presença de um ou mais destes elementos condiciona para a realização dos seguintes estudos:

- Monitoramento da visitação existente ou de grupos-piloto, para efeito de teste
- Fluxos de ar e água, para identificação de padrões de acúmulo e dispersão
- Monitoramento higrotérmico do ar, com quantidade de estações que permita exprimir a variabilidade atmosférica subterrânea
- Monitoramento da temperatura de cursos d'água e de pontos específicos da rocha, corpos de gelo e/ou de espeleotemas
- Monitoramento das concentrações de CO₂
- Monitoramento das concentrações de ²²²Rn, considerando os riscos à saúde dos guias e visitantes.

Estes estudos permitem identificar qual o parâmetro que recebe maior influência da presença humana, seja em relação ao maior nível pontual de variação obtido, seja no tempo necessário para o restabelecimento das condições habituais. A pesquisa de campo demonstrou que não existe um padrão fixo para estes parâmetros, podendo variar caso a caso. Isto corrobora os estudos anteriores consultados, evidenciando a necessidade de estudos específicos para cada caverna ou área de uma caverna a ser considerada para o uso público. A partir da identificação dos fatores críticos, estes também serão utilizados na continuidade prática do método, em procedimentos de contínuo monitoramento ambiental.

Além disso, estes diagnósticos ambientais podem encontrar parâmetros cuja resposta seja variável em função da sazonalidade natural do ambiente, tal como já observado no trabalho de Lario; Soler (2010). Neste caso, serão obtidos níveis distintos de capacidade de carga espeleoturística, em cada época do ano.

8.5.4. Transformação do fator crítico em índice de limitação

Os índices de limitação são obtidos a partir dos fatores críticos identificados na análise ambiental preliminar. Duas formas possíveis de redução são consideradas: a espacial e a temporal.

Na limitação espacial, são consideradas as possibilidades de alteração do caminamento proposto, isolando salões, condutos ou trechos destes, de um potencial risco em função da incompatibilidade identificada entre a visitação e a conservação ambiental. Deve ser utilizada em casos como:

- Existência de espeleotemas, vestígios arqueo-paleontológicos, corpos d'água e minerais; no chão, paredes ou teto, que serão eminentemente danificados pelo pisoteamento, pelo toque com as mãos, ou por impactos com o capacete
- Geração de impactos cumulativos de difícil restabelecimento nos parâmetros atmosféricos.

Este isolamento pode ser aplicado em escala local – protegendo apenas o fator crítico, quando este é pontual – ou se estender para todo um salão ou uma caverna. Nos parâmetros atmosféricos, a existência de zonas de acúmulo térmico ou de CO₂ pode ser uma das justificativas para esta estratégia de conservação. Para tanto, conhecer os padrões de acúmulo e dispersão é fundamental para fornecer o suporte adequado para a tomada de decisão.

Por outro lado, a limitação temporal – já utilizada como base de manejo de cavernas na Nova Zelândia (FREITAS, 2010) – é a principal estratégia de conservação da presente metodologia, em função das características fisiográficas dos ambientes subterrâneos. Embora seja importante isolar determinados trechos de uma caverna para preservá-los dos impactos da visitação, a perspectiva temporal passa a ser o fator regulador de uso de todas as demais áreas abertas à visitação.

Em essência, a limitação temporal se refere à proporcional redução do tempo total de uso de um determinado trecho de uma caverna ou de sua totalidade, em função da redução da pressão antrópica em áreas consideradas críticas. Estas áreas são aquelas detentoras de maiores fragilidades ambientais relativas, bem como pontos de parada (descanso, interpretação etc) e pontos coincidentes no trajeto de visitação, que podem gerar gargalos e consequente acúmulo de grupos.

A limitação temporal pode ser obtida por meio da redução do tempo de permanência nas paradas dentro da caverna. O intervalo de entrada hipotético ou real ($I_{e_{H, R}}$) deve ser maior ou igual ao tempo de permanência máximo em algum

ponto dentro da caverna, o que interfere diretamente na capacidade de carga de cavernas turísticas (CCC_T). Esta condição é básica para o princípio de limitação temporal. Se o le for menor que o tempo máximo aceitável de permanência, as consequências eminentes são: aumento da probabilidade de geração de impactos cumulativos nas variáveis ambientais; e o encontro entre grupos dentro da caverna, gerando maiores intervalos de espera, desconforto psicológico, baixa qualidade na visita e, dependendo da caverna, até mesmo desconforto térmico e/ou aumento do risco de reações fisiológicas às condições ambientais subterrâneas adversas.

Os fatores críticos podem variar para cada situação analisada. Assim, a limitação temporal deve ser adaptada para cada realidade, sempre tendo por base a identificação do limite aceitável de alteração para o estabelecimento de um índice de limitação temporal. Na caverna de Santana, os dados coletados demonstraram basicamente que não existe relação diretamente proporcional:

- Entre o total de pessoas por grupo e a alteração nos parâmetros atmosféricos
- Entre o total de visitas diárias e a alteração nos parâmetros atmosféricos.

Por outro lado, a correlação entre a presença de visitantes e a alteração da temperatura do ar, da rocha e da concentração de CO_2 permanece evidente.

Os dados espeleoclimáticos coletados permitiram a obtenção de um coeficiente empírico para a identificação do índice limite de permanência (ILp_{Max}) em cada área da caverna. Para tanto, a ênfase da análise não se concentra na dinâmica natural do ambiente como fator limitante (cf. HOYOS et al., 1998, entre outros), mas sim, no tempo disponível para estabilização do parâmetro afetado pela visita. O conhecimento prévio deste tempo limite (Tl) é fundamental, para que testes-piloto possam identificar sua relação com o tempo total necessário para estabilização (Tte) a partir da ocorrência de um impacto antrópico.

É preciso também considerar que a necessidade de diminuição do tempo de permanência em um determinado ponto de uma caverna ocorre em função do aumento de sua fragilidade relativa. Assim, é necessário eliminar um possível efeito inversamente proporcional da aplicação direta do intervalo de entrada: um ILp_{Max} menor permitiria o aumento no intervalo de entrada e, por consequência, no aumento da capacidade de carga final. Esta situação é inaceitável, à medida que ILp_{Max} menores indicam ambientes proporcionalmente mais frágeis. Este fator foi considerado para a obtenção da relação entre estes parâmetros temporais, resultando na Equação 8.4. Testes empíricos com valores aleatórios foram

realizados para testar a funcionalidade da equação em função da variabilidade do tempo de permanência e capacidade de retorno ao estado estacionário, sendo apresentados no APÊNDICE C.

$$ILp_{Max} = \frac{\left(\frac{Tte}{TI}\right)}{Tpi} \quad (8.4)$$

Onde:

ILp_{Max} = Índice limite de permanência aceito para uma determinada área da caverna, em minutos;

Tte = Tempo total, em minutos, necessário para a estabilização do parâmetro atmosférico analisado, identificado em testes piloto;

TI = Tempo limite, em minutos, para a recuperação do ambiente, que é obtido a partir do horário de fechamento do roteiro até o seu horário de reabertura no dia posterior; e

Tpi = Tempo de permanência, em minutos, que gerou o impacto sob análise, identificado em testes piloto.

Com o cálculo do ILp_{Max} , pode-se estabelecer o intervalo de entrada real entre os grupos (Equação 8.5):

$$Ie_R = Trv * ILp_{Max} \quad (8.5)$$

Onde:

Ie_R = Intervalo real de tempo para a entrada de grupos na caverna, em minutos;

Trv = Tempo real de visitação; e

ILp_{Max} = Índice limite de permanência aceito para uma determinada área da caverna, em minutos.

Com isso, substitui-se o ILp_{Max} na Equação 8.5, obtendo-se diretamente o intervalo real de tempo de entrada de grupos na caverna pela Equação 8.6:

$$Ie_R = Trv * \frac{\left(\frac{Tte}{TI}\right)}{Tpi} \quad (8.6)$$

O tempo limite para estabilização dos parâmetros afetados (TI) não garante a inexistência de danos ao ambiente analisado. A princípio, trata-se de uma medida cautelar, focada tão somente na prevenção de impactos cumulativos da visitação diária no ambiente. Estudos como os de Song et al. (2000), Fernández-Cortés et al. (2006c) e Domínguez-Villar et al. (2010) demonstram que a ocorrência de impactos cumulativos na atmosfera é um dos fatores críticos para a ampliação do intemperismo subterrâneo. Em outro estudo, na caverna Frassassi – uma das mais

visitadas da Itália, com mais de 400.000 visitas/ano –, Bertolani; Cigna (1994) reportam variações críticas de temperatura do ar e de CO₂ em função do turismo. Os autores demonstraram que existe também uma sazonalidade anual a ser considerada, apontando que em determinados meses, o tempo de estabilização excede o limite em que a caverna fica fechada para a visita, durante a noite. Assim, sempre que o valor do T_{te} for maior do que o Tl disponível, deve-se alterar um dos padrões de manejo, como aumentar o Tl – diminuindo o Trv , por exemplo – ou pesquisando as consequências deste fator cumulativo à longo prazo.

Assim, o valor de Tl pode ser estipulado para cada fator crítico considerado, em função de pesquisas que comprovem os limites aceitáveis de impacto de cada variável sem que ocorram interferências permanentes no ambiente.

A Equação 8.6 é aplicável a qualquer parâmetro atmosférico que possa ser aferido em escala temporal e que apresente resposta à presença humana. Todavia, ao contrário do método de Cifuentes, a aplicação se faz em um único fator: aquele que apresentar resposta mais drástica à visita, de forma a permitir verificações futuras dos limites temporais e da CCC_T obtida (Figura 8.10).

CAPACIDADE DE CARGA DE CIFUENTES	CAPACIDADE DE CARGA ESPELEOTURÍSTICA
FATORES CRÍTICOS	
FC 1: 20% FC 2: 5% FC 3: 3% FC 4: 12%	le_R 1: 17 min. le_R 2: 35 min. le_R 3: 18 min. le_R 4: 21 min.
Fator de redução da capacidade de carga: 40% do valor inicial proposto (FC 1 + FC 2 + FC 3 + FC 4)	Índice de detração da capacidade de carga espeleoturística: Entrada de grupos a cada 17 minutos, direcionando o volume de visita em função do tempo de recuperação do fator crítico considerado.

Figura 8.10 – Comparação entre as formas de redução do volume de visita a partir dos valores críticos identificados, no método de Cifuentes e na presente proposta

Na proposta de Cifuentes-Arias et al. (1999), a sobreposição de fatores impede a identificação de um fator crítico de análise e da resiliência do ambiente,

por gerar limitação excessiva, cumulativa e injustificada. A presente proposta permite a execução destes testes em função de cada fator crítico, bem como se baseia em seus resultados para a obtenção da capacidade de carga espeleoturística.

8.5.5. Obtenção da capacidade de carga de cavernas turísticas (CCC_T)

A identificação da capacidade de carga espeleoturística (CCC_T) poderá ser obtida por meio de duas etapas finais, atreladas ao monitoramento de parâmetros atmosféricos. Na primeira delas, o cenário projetado (Cv) é testado, verificando se o intervalo hipotético de entrada de grupos na caverna (IE_H) é maior que o intervalo calculado para a entrada dos grupos (Ie). Em caso afirmativo, significa que o cenário é aceitável do ponto de vista da capacidade de resiliência da atmosfera subterrânea, em função de seu parâmetro crítico selecionado. Caso não ocorram impactos cumulativos nos fatores críticos analisados, de forma que as variações registradas não excedam o tempo limite para a recuperação do ambiente (Tl), pode-se admitir os valores propostos no Cv como a capacidade de carga espeleoturística da caverna (CCC_T). Neste caso, a CCC_T pode até ser testada visando sua futura ampliação, havendo necessidade e/ou interesse.

Todavia, esta ampliação precisa ser limitada em função dos próprios fatores atmosféricos em questão, considerando para tanto o cenário projetado com o maior número de visitas por grupo. A limitação máxima em função de um parâmetro crítico atmosférico é obtida por meio da Equação 8.7:

$$CCC_T = \left(\frac{Trv}{Ie_R} \right) * Ev_R \quad (8.7)$$

Onde:

CCC_T = Capacidade de carga espeleoturística;

Trv = Tempo real de visitação;

Ie_R = Intervalo real, em minutos, para a entrada de grupos na caverna;

Ev_R = Escala de visitação real, correspondente ao máximo de pessoas por grupo nos testes realizados em campo ou em função de limitações espaciais.

A obtenção da Ev pode ser feita de duas maneiras. Além da projeção de cenários, já proposta anteriormente, pode também ser feito como em Villar et al. (1984b), quando se identifica certa linearidade entre o total de pessoas por grupo e

as respostas obtidas nos fatores críticos considerados. Com isso, demonstrou-se que nestes casos, é mais viável distribuir os visitantes em grupos menores, do que concentrá-los em grupos grandes, de forma a diminuir os impactos da visitação.

8.5.6. Monitoramento dos fatores críticos considerados

A última fase da capacidade de carga espeleoturística (CCC_T) é a implantação de um programa de monitoramento, com base nos fatores críticos que foram utilizados e outros que sejam julgados necessários para a compreensão da dinâmica de resposta do ambiente em relação ao nível de estímulo proposto. A função maior do monitoramento é acompanhar a evolução do processo estabelecido e melhorá-lo por retroalimentação, permitindo a verificação contínua da hipótese numérica de capacidade de carga espeleoturística determinada na fase anterior.

Assim, a capacidade de carga espeleoturística não deve ser compreendida meramente como um cálculo. Como defendido anteriormente (LOBO, 2008b), a capacidade de carga é um processo contínuo, uma ferramenta diária para a gestão ampliar ou reduzir os volumes permitidos de visitação de uma caverna em função dos resultados de um programa de monitoramento. Somente em estudos de longo termo é possível compreender melhor qual o estado estacionário de cada variável pesquisada e a dinâmica de pressão-estado-resposta do vetor sob análise – no caso, o espeleoturismo. Isto permite até mesmo a geração de um modelo de predição, embora não seja esta a finalidade maior do método.

O nível de detalhe, a periodicidade de coleta e o intervalo temporal do monitoramento deverão ser definidos a cada caso. Todavia, o detalhamento utilizado não pode ser inferior àquele do estudo ambiental preliminar, sob o risco de gerar discrepâncias nos resultados. Por fim, o monitoramento dos fatores ambientais deve ser acompanhado de um monitoramento da satisfação dos envolvidos no espeleoturismo, como os operadores do sistema e os consumidores. Isto permite a análise de fatores de ordem psicossocial e da percepção ambiental, o que pode ser fundamental para fornecer mais um suporte ao processo de tomada de decisão que envolve a adaptação contínua da capacidade de carga espeleoturística.

8.6. Funcionalidade e aplicação do método proposto

A aplicação do método foi realizada com os dados coletados na caverna de Santana. Primeiramente, foi proposta a correção parcial do circuito tradicional de

visitação, que possui dois pontos de estrangulamento no caminhamento: os salões do Cavalo e do Cristo. Considerando a existência de possibilidades espaciais que permitam a adoção de um circuito circular nestes trechos, foi proposta a modificação do caminhamento¹⁷ (Figura 8.11). Esta opção visa melhorar o fluxo de visitação na caverna de Santana, sobretudo no salão do Cristo, um dos pontos monitorados durante a pesquisa e com resposta térmica em função da visitação.

¹⁷ A proposta de alteração do caminhamento foi formalmente antecipada   gestão do PETAR antes da conclusão desta tese, em março de 2009. Posteriormente, foi incorporada ao Plano de Manejo Espeleológico da caverna de Santana.



Figura 8.11 – Alteração proposta no circuito tradicional de visitação da caverna de Santana, nos salões do Cavallo (1) e do Cristo (2)

Também foram calculadas as áreas aproximadas dos pontos de estrangulamento nas principais áreas de dispersão no circuito de visitação: Bolo de Noiva (37 m²); Faf  (35 m²); Bacon (21 m²); Cristo (27 m²) e Encontro (22,5 m²). Destes, o ponto crítico foi o Bacon. Com base no espaço mínimo proposto na subse o 8.5.1, identificou-se um máximo de 24,7 pessoas neste salão (24, para fins práticos), valor utilizado nos c culos subsequentes.

Considerando o caminhamento proposto, partiu-se para a proje o do cenário de visita o. Os testes de campo realizados durante esta pesquisa foram feitos considerando o dobro da capacidade de carga atual da caverna, de 117 visitas/dia, proposto em Lobo (2008b), totalizando, assim, 334 visitas/dia. Este valor foi admitido em comum acordo com a gestão do PETAR, de forma a viabilizar tanto a pesquisa de campo quanto os trabalhos de Scaleante et al. (2009), em curso àquela época para o plano de manejo espeleológico da caverna de Santana. A visita o era feita em grupos de tamanhos variados, de até 30 visitantes, pois o intuito era estudar as diversas possibilidades de respostas ambientais aos estímulos realizados.

O tempo total em que o roteiro está aberto ao uso (Tt)   de 9h, ou 540min. Baseado nos dados coletados em campo foi calculado o tempo médio gasto para percorrer o roteiro (Tv), de 1h 53min, ou 113min. Este valor   muito próximo ao obtido em estudo semelhante sobre a dinâmica do fluxo de visita o feito por Scaleante et al. (2009), que obteve um Tv de 130min. Nos dados da pesquisa, não foi possível comprovar as diferenças entre grupos visitando a caverna para diferentes finalidades, como estudos do meio ou contempla o, embora seja notável a maior permanência dos grupos de estudo dentro da caverna, em detrimento dos grupos de contempla o. Futuramente, análises mais apuradas poderão estabelecer diferentes níveis de capacidade de carga espeleoturística para a caverna de Santana, com base nas diferentes necessidades destes perfis de visitantes. Todavia, para efeito de teste da metodologia, serão utilizadas duas escalas de visita o (Ev), tal como definido preliminarmente em Lobo et al. (2010b) para a caverna de Santana: grupos de 18 visitantes aos finais de semana e feriados (16 turistas e dois monitores ambientais locais), para atender a demanda de lazer, o que foi preconizado em seu plano de manejo espeleológico (FUNDA O FLORESTAL; EKOS BRASIL, 2010); grupos de 24 visitantes nos dias úteis (21 turistas e 3 monitores ambientais locais), para atender a demanda de estudos do meio,

reduzindo o valor de 27 visitantes por grupo proposto para este fim no plano de manejo espeleológico.

Com os dados obtidos, calcula-se inicialmente o Trv :

$$Trv = Tt - Tv$$

$$Trv = 540 - 113$$

$$Trv = 427 \text{ minutos.}$$

Com estes dados, pode-se obter os le_{HS} da caverna de Santana:

$$le_H = \frac{Trv}{\frac{Cv}{Ev}}$$

Sendo o le_{HFS} para os finais de semana e feriados:

$$le_{HFS} = \frac{427}{\frac{334}{18}}$$

$$le_{HFS} = 23,01 \text{ minutos}$$

E o le_{HDU} para os dias úteis:

$$le_{HDU} = \frac{427}{\frac{334}{24}}$$

$$le_{HDU} = 30,6 \text{ minutos}$$

Com base nos dados coletados nas três fases desta pesquisa, foi possível identificar impactos de origem antrópica na temperatura do ar e na concentração de CO_2 , além da hipótese de impacto na temperatura da rocha. Destes, apenas a temperatura do ar apresentou dados suficientes, com resultados expressivos e confiáveis nas fases de monitoramento anual e trimestral em escala de detalhe, permitindo seu uso como parâmetro de controle para a capacidade de carga espeleoturística da caverna de Santana. Assim, repete-se a conclusão de Cigna; Forti (1988), de que a temperatura do ar é fator preponderante para a capacidade de carga em cavernas. Realizou-se breve análise nos dados (Tabelas 8.7 e 8.8), de forma a identificar os tempos totais de estabilização (Tte) em função dos impactos térmicos gerados, nas estações Cristo e Encontro.

Tabela 8.7 – Análise do tempo total de estabilização da temperatura do ar nos dias de maior acréscimo térmico – estação Cristo

Data	Temp. (°C) pré- visitação (9h)	Pico térmico (°C)	Horário de pico	Horário de estabilização térmica	Tempo total de estabilização (min.)
10.out.2009	19	19,5	15h 00min	21h 30min	390
11.out.2009	19	19,6	13h 30min	17h 30min	240
12.out.2009	19,1	19,5	10h 30min	15h 00min	270
17.out.2009	19,1	19,9	14h 30min	2h 30min	720
18.out.2009	19,1	19,5	10h 00min	13h 30min	210
27.out.2009	19,2	19,6	14h 00min	23h 30min	570
31.out.2009	19,2	19,6	14h 00min	16h 30min	150
1.nov.2009	19,2	19,8	13h 30min	16h 00min	150
2.nov.2009	19,2	19,6	12h 30min	15h 30min	180
7.nov.2009	19	19,8	15h 00min	17h 00min	120
14.nov.2009	19,1	19,6	11h 00min	14h 30min	210
20.nov.2009	19,1	19,5	14h 30min	16h 30min	120
4.jul.2010	19,1	19,7	15h 00min	17h 20min	260
17.jul.2010	19,5	20,2	11h 20min	19h 20min	180 ¹
23.jul.2010	19,7	20,1	11h 00min	13h 40min	160
25.jul.2010	19,7	20	11h 20min	16h 40min	140 ¹
30.jul.2010	19,7	20,1	11h 00min	13h 00min	120
12.ago.2010	20	20,4	11h 40min	13h 20min	100
14.ago.2010	20	20,5	16h 20min	19h 20min	180
18.ago.2010	20	20,9	16h 00min	19h 40min	220
19.ago.2010	19,9	20,5	15h 00min	19h 00min	360
21.ago.2010	20	20,4	15h 00min	18h 20min	200
5.set.2010	20	20,7	13h 00min	0h 40min	700
6.set.2010	20	20,7	14h 20min	19h 20min	300
9.set.2010	20	20,7	15h 40min	18h 00min	140

¹ Nos dias 17 e 25 de jul. o tempo de estabilização não foi computado em função do maior pico, mas sim de um pico secundário ocorrido posteriormente.

Tabela 8.8 – Análise do tempo total de estabilização da temperatura do ar nos dias de maior acréscimo térmico – estação Encontro

Data	Temp. (°C) pré- visitação (9h)	Pico térmico (°C)	Horário de pico	Horário de estabilização térmica	Tempo total de estabilização (min)
4.out.2009	18,3	18,7	12h 30min	16h 00min	150
10.out.2009	18,4	18,7	12h 30min	16h 30min	240
11.out.2009	18,4	18,8	13h 00min	16h 30min	210
12.out.2009	18,2	18,4	12h 30min	16h 30min	240
17.out.2009	18,4	18,8	13h 00min	16h 00min	180
18.out.2009	18,3	18,6	10h 00min	13h 00min	180
31.out.2009	18,2	18,8	11h 30min	15h 00min	210
1.nov.2009	18,2	18,5	11h 30min	16h 00min	270
2.nov.2009	18,1	18,5	9h 30min	14h 00min	180 ¹
7.nov.2009	18,1	18,5	15h 00min	18h 00min	180
14.nov.2009	18,2	18,6	11h 30min	16h 00min	270
20.nov.2009	18,2	18,6	15h 00min	18h 30min	210

¹ No dia 2 de nov. o tempo de estabilização não foi computado em função do maior pico, mas sim de um pico secundário.

Para a organização das Tabelas 8.7 e 8.8, foi feita uma primeira análise qualitativa dos dados registrados. Nela não foram considerados os impactos cuja magnitude era próxima à margem de erro dos instrumentos (0,1 - 0,2 °C), bem como aqueles em que o tempo de estabilização era inferior à 1h após o impacto.

O maior tempo de estabilização registrado na estação Cristo foi de 720min, no dia 17 de outubro de 2009. Na estação Encontro, este valor chegou a 270min, em duas ocasiões: dias 1º e 14 de novembro de 2009. Em ambas as estações, os maiores valores estão associados aos finais de semana e feriados.

A média do tempo total de estabilização da estação Cristo foi de 255,6min, enquanto que na estação Encontro foi de 210min. Desta forma, e com base nos picos maiores, compreendeu-se que a estação Cristo é o principal gargalo da visitação, sendo usada como base para a obtenção do *Tte*. Para definir qual o valor a ser utilizado como *Tte*, foi executada breve análise descritiva dos dados por meio de um histograma (Figura 8.12).

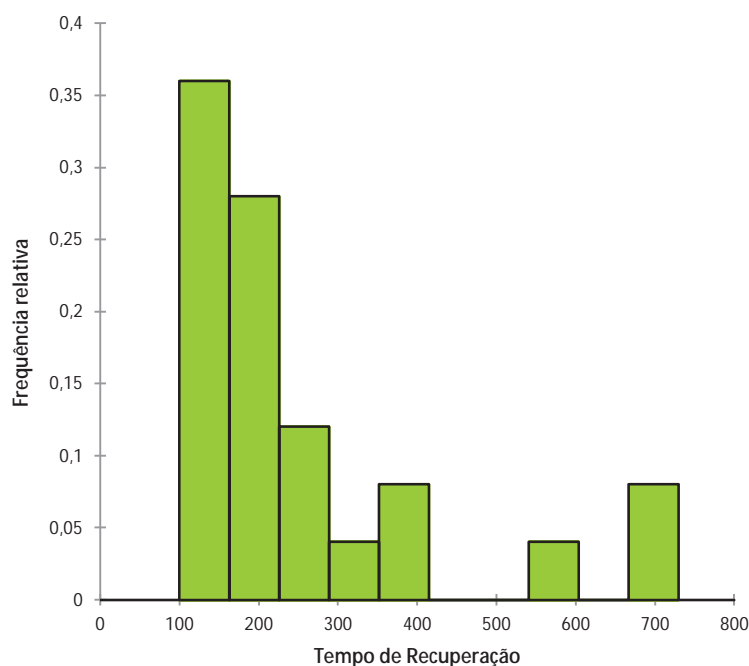


Figura 8.12 – Análise do tempo total de estabilização da temperatura do ar nos dias de maior acréscimo térmico – estac o Cristo

A análise visual da Figura 8.12 permite concluir que, na maioria dos casos, o tempo total de estabilização da temperatura do ar na estac o Cristo foi inferior   300min. A média da série foi de 255,6min e a mediana foi de 200min. Os valores extremos, na casa dos 550min e 700min foram exceções ao padrão geral de

resposta do ambiente. Os picos ocorreram nos dias 17 de outubro (720min para a estabilização, com visitação acumulada de 149 visitas/dia) e 27 de outubro (570min; 88 visitas/dia) de 2009 e no dia 5 de setembro de 2010 (700min; 183 visitas/dia). Todavia, não foi encontrada relação diretamente proporcional entre o total de visitas e o tempo de estabilização. Como exemplos, os dias 11 de outubro de 2009 e 10 de julho de 2010 receberam, respectivamente, 208 e 200 visitas/dia. Porém, o tempo total de estabilização foi de 240min e 180min, respectivamente. Desta forma, os picos não foram interpretados como o valor ideal para o tempo total de estabilização, mas sim, como valores anômalos.

Optou-se, então, pelo uso da média para o tempo total de estabilização, sem desconsiderar os valores extremos em seu cálculo. Com isso, o Tte corresponde à 255,6min.

O tempo limite para a estabilização (Tl) é obtido com base no intervalo de tempo entre o fechamento da caverna (17h) e sua reabertura para visitação, totalizando em 16h (960min).

Como não houve registro simultâneo do tempo de permanência (Tpi) no salão onde os impactos foram gerados, admite-se para efeito demonstrativo o tempo médio de permanência registrado por Scaleante et al. (2009) para o salão do Cristo, de 15 minutos. Com estes dados, pode-se calcular o le_R do fator crítico temperatura do ar.

$$le_R = Trv * \frac{\left(\frac{Tte}{Tl}\right)}{Tpi}$$

$$le_R = 427 * \frac{\left(\frac{255,6}{960}\right)}{15}$$

$$le_R = 7,57\text{min}$$

Por fim, este valor é transposto para a equação da capacidade de carga espeleoturística, para a identificação do limite máximo aceitável.

$$CCC_T = \left(\frac{Trv}{le_R}\right) * Ev_R$$

$$CCC_T = \left(\frac{427}{7,57}\right) \times 24$$

$$CCC_T = 1353,7 \text{ visitas/dia.}$$

Em termos práticos, considerando a escala de visitação adotada, seria obtido o total real máximo de 1344 visitas/dia, divididas em 56 grupos de até 24 visitantes/cada, com entrada a cada 7min e 30s na caverna.

Com isto, o teste das hipóteses de visitação demonstra que ambas as possibilidades de visitação – grupos à cada 23,01min nos finais de semana e feriados e 34,51min nos dias úteis – estão em limites aquém do máximo permitido sob o ponto de vista atmosférico. Por outro lado, a determinação da capacidade de carga com base em fatores ambientais não considera questões relativas ao conforto e à segurança para o visitante, aspectos fundamentais para a manutenção sustentável de um produto turístico.

Assim, com base em fatores ambientais e sociais, possibilidades primárias de ajuste podem ser consideradas para efeitos de aplicação prática da capacidade de carga espeleoturística na caverna de Santana, como por exemplo:

- Intervalo de entrada de 20min aos finais de semana e feriados, o que permitiria um máximo de 21 grupos de 18 pessoas, totalizando 378 visitas/dia
- Intervalo de entrada de 30min em dias úteis, o que permitiria um máximo de 14 grupos de 24 pessoas, totalizando 336 visitas/dia.

Lembrando que os intervalos de tempo acima pontuados são apenas sugestões, de forma a ilustrar a flexibilidade do método proposto e a importância do monitoramento constante das variáveis ambientais, da satisfação dos visitantes e da dinâmica de trabalho na caverna para obter níveis mais adequados de visitação. Embora limites maiores sejam teoricamente possíveis, diversos fatores devem ser considerados para que este aumento seja gradativo e calcado em testes práticos. A diminuição drástica dos intervalos de entrada entre os grupos pode gerar variações significativas no tempo de permanência nos pontos de parada do circuito, tendo como possíveis consequências a alteração da condição de resposta ambiental identificada no ponto crítico (salão do Cristo) ou mesmo a identificação de outro ponto crítico na caverna de Santana. A inexistência de linearidade nos dados coletados é significativa para a adoção de um nível cautelar, posto que os limites em questão são baseados em dados pretéritos que tiveram um máximo de 229 visitas/dia, em 5 de setembro de 2009. Valores acima disto, como a capacidade de carga espeleoturística máxima (1344 visitas/dia) ou mesmo a capacidade de carga sugerida (378 visitas/dia) são passíveis de testes práticos concomitantes a um programa de monitoramento, tal como preconiza o presente método.

8.6.1. Validação do resultado obtido e consolidação da capacidade de carga espeleoturística

Do ponto de vista matemático e do teste das hipóteses de visitação, a validação dos resultados obtidos foi feita na fase final do cálculo, permitindo, como demonstrado, a proposição de uma CCC_T cujo valor é um meio-termo entre os cenários – hipotético sugerido e atual – e o limite máximo calculado.

Todavia, pesquisas futuras devem aplicar de forma prática a etapa sugerida na subseção 8.5.6 deste capítulo, realizando novo procedimento de monitoramento ambiental em escala mais detalhada de análise, para a identificação de limites de visitação com base: a) no total de pessoas/grupo; b) na análise simultânea do tempo de permanência dos grupos nos pontos críticos da caverna; e c) na possível interferência da sazonalidade climática, fator este que não apresentou, na pesquisa realizada, alteração nos níveis de resposta aos impactos gerados pela visitação.



Capítulo 9
CONCLUSÕES

Muita água rolou para se chegar até aqui...
Mas o que se vê agora não é o fim,
é apenas um momento no tempo e no espaço.
O trabalho certamente continua.

CAPÍTULO 9 – CONCLUSÕES

O estudo dos parâmetros atmosféricos demonstrou, primeiramente, a importância da extensão temporal e da densidade nos pontos de coleta, tanto no monitoramento higrotérmico quanto na obtenção de perfis atmosféricos. No monitoramento, foi possível identificar zonas críticas dentro do atual circuito de visitação, sujeitas aos processos de acúmulo decorrentes de impactos, quer em função de suas características fisiográficas, quer pelas práticas de turismo adotadas. Isto demonstra que os intervalos temporais de 20min e 30min para o registro dos dados foram suficientes para uma caracterização mais geral. Por outro lado, a posterior validação dos resultados em fases de monitoramento para correção da capacidade de carga deve ser feita em escala de maior detalhe, com intervalos de coleta de 5min à 15min.

As informações obtidas no monitoramento foram complementadas com os perfis térmico, higríco, da pressão atmosférica e do CO₂, que evidenciaram a relação entre o confinamento espacial e a variação vertical com o proporcional aumento nos valores aferidos. Isto contribuiu para a identificação de possibilidades de uso e preservação, em função de ambientes mais dispersivos ou cumulativos.

As análises estatísticas de séries temporais – a suavização pela média móvel, a autocorrelação, a densidade espectral e a correlação cruzada – possibilitaram um

detalhamento no conhecimento da dinâmica do ambiente nos pontos monitorados, contribuindo para a aferição dos impactos da visitação e para as análises integradas do sistema atmosférico. Com isso, foram identificadas zonas climáticas na caverna de Santana, permitindo melhor compreensão da dinâmica do ambiente. Isto também foi possível em função do monitoramento conjunto do sistema ar-água-rocha, permitindo ajustes na modelagem atmosférica qualitativa. As zonas ambientais identificadas possuem forte componente espacial, com grande influência do rio Roncador e da cobertura rochosa, bem como da estratificação horizontal em relação ao meio externo e vertical em relação aos níveis de galeria.

Sobre o CO₂, os dados registrados foram incipientes, de forma que conclusões mais apuradas deverão ser obtidas por pesquisas futuras, tanto sobre sua dinâmica natural quanto acerca de possíveis interferências antrópicas. O estado estacionário do CO₂ no ambiente na ausência de visitantes variou entre 1000 ppm e 1100 ppm. Acréscimos de até 190 ppm foram identificados em função da visitação, os quais se dissiparam em questão de horas.

Sobre a caracterização atmosférica, a média anual (2009-2010) da temperatura do ar no ambiente externo foi de 19,99 °C e a moda foi 17,9 °C. Os extremos registrados foram entre 32,9 °C (máxima, na estação Externa) e 6,1 °C (mínima, na estação Boca). Se considerado o regime das chuvas, a máxima no período mais chuvoso foi de 32,9 °C e a mínima de 13,8 °C. No período menos chuvoso, que coincide com o inverno, a máxima registrada foi de 29,4 °C e a mínima de 6,1 °C. A maior diferença, no entanto, se revela na média, sendo de 21,35 °C no período mais chuvoso (verão) e de 18,06 °C no período menos chuvoso (inverno). Se comparado ao período menos chuvoso do ano de 2010, esta diferença se acentua, quando a média de temperatura foi de 16,55 °C. A umidade relativa média foi de 98,9%, sendo a máxima de 99,9% e a mínima de 60,2%. No ambiente interno, tomando por base a estação Rio III – que não apresentou interferências da visitação –, a temperatura mínima registrada foi de 17,3 °C, e a máxima de 19,3 °C (com exceção de um valor anômalo, descartado para fins de caracterização geral). A média anual foi de 18,28 °C, a moda 18,1 °C. As diferenças nas médias entre períodos mais e menos chuvoso foram inferiores à 0,5 °C. Neste ponto, a umidade relativa do ar foi constante em todo o período monitorado, no valor de 99,9%.

No salão do Cristo foram registradas amplitudes térmicas de até 1,1 °C em função da presença de visitantes. No salão do Encontro este valor se estendeu até

1,3 °C. Nos demais pontos da caverna, não foram identificadas variações térmicas significativas de comprovada origem antrópica.

A umidade relativa do ar é de baixa variabilidade e com índices sempre próximos da saturação hídrica (99,9%) na maior parte da caverna, principalmente nas galerias superiores. Embora tenha sido pouco utilizada nas análises realizadas, esta informação é igualmente importante, pois a saturação hídrica do ar é responsável pela presença constante de aerossóis no ambiente, o que estimula as interações químicas com os corpos carbonáticos. Isto se percebe tanto em campo quanto nos resultados das análises de espeleotemas em MEV, pela notável presença de corrosão em cristais de calcita, atribuída à condensação.

Os dados do monitoramento ambiental permitiram também a interpretação dos modelos gerais de circulação atmosférica da caverna de Santana, demonstrando seu padrão cumulativo térmico em relação às galerias superiores, tal como descrito nos trabalhos de Cigna (1967, 2004) para o padrão “armadilha para a captura do ar quente” para outras cavernas. A célula de aprisionamento do ar quente possui tamanho variável, sendo mais extensa no verão e dias muito quentes, e se retraindo no inverno e dias muito frios, gerando uma dinâmica de renovação do ar na caverna pela degaseificação. O perfil térmico suscita especial atenção para as galerias do rio Verde, Discos-São Paulo e salão das Flores, enquanto que o monitoramento evoca maiores preocupações nos salões do Cristo e do Encontro.

Sobre o padrão de circulação atmosférica da caverna de Santana, faz-se necessária uma complementação futura em escala de detalhe, para melhor compreensão da origem e destino da movimentação gasosa em seu interior e de limites mais tênues entre salões como São Paulo – São Jorge ou Discos – Vulcões, como exemplos.

O conjunto de informações sobre os impactos atmosféricos e geoespeleológicos obtido na pesquisa foi direcionado para a identificação de fatores críticos de manejo, que se constituem em indicadores ambientais de resposta à visitação. Foram identificados impactos na temperatura do ar, na concentração de CO₂ e na superfície de espeleotemas na caverna de Santana, comprovando assim as hipóteses secundárias da pesquisa.

A dissipação dos impactos gerados na temperatura do ar e na concentração de gás carbônico é breve, confirmando que nem todas as alterações antropogênicas são danosas ao ambiente. A variação do CO₂ ainda não apresenta padrões

conclusivos, face à descontinuidade temporal dos dados. Todavia, o padrão de excitação e posterior estabilização é muito semelhante ao da temperatura do ar, o que permite a conclusão da existência de impacto antrópico neste parâmetro.

Os impactos nos espeleotemas em função do humo produzido pela queima do acetileno nas carbureteiras foram confirmados, principalmente pelas análises químicas, mas também, por meio da comparação com dados secundários publicados em outros estudos, pela deterioração da microtopografia das amostras coletadas. Os espeleotemas também sofrem impactos decorrentes da presença humana mesmo sem o uso das carbureteiras, por meio da deposição de corpos estranhos diversos, como fibras de tecido, fragmentos de pele e, possivelmente, até mesmo material biológico.

Decorrente disso, conclui-se também que a iluminação à base de acetileno em cavernas deve ser restringida ao mínimo necessário, como no caso de realização de pesquisas e trabalhos específicos onde o tipo de luz que as carbureteiras produzem seja imprescindível. Esta preocupação diz respeito não somente ao espeleoturismo, pois mesmo com base em dados secundários, foram identificados potenciais contaminantes no carbureto de cálcio, em função de impurezas em sua fabricação. Assim, a restrição à exposição a estes eventuais contaminantes é fundamental para a saúde de frequentadores habituais de cavernas, como guias de turismo, monitores ambientais, pesquisadores e espeleólogos.

O estabelecimento de parâmetros lógicos para a capacidade de carga espeleoturística foi o principal objetivo da presente pesquisa. Com base em escalas temporais de análise, foram identificados limites aceitáveis de alteração de variáveis ambientais para cavernas sem fragilidades preponderantes, como pinturas rupestres ou minerais instáveis. Para tanto, os preceitos tradicionais de capacidade de carga aplicados em cavernas foram parcialmente refutados ou adaptados, tais como: a) o dimensionamento da visitação por fatores convertidos em restrições espaciais, com base no método desenvolvido por Cifuentes-Arias (1992) e aplicado em cavernas por Boggiani et al. (2007) e outros; e b) a limitação da visitação em função do limite determinado pela amplitude térmica habitual do ambiente, tal como aplicado em Hoyos et al. (1998) e Calaforra et al. (2003). Estabeleceu-se, então, nova base de manejo da visitação, centrada em fatores temporais e na capacidade de resiliência do ambiente. Com isso, o total de visitas diárias deixou de ser premissa do método e

passou a ser uma consequência da limitação no tempo de permanência nos pontos críticos de uma caverna, de modo a não gerar impactos cumulativos no ambiente. Por outro lado, as análises por EDS, no MEV e químicas laboratoriais suscitaram preocupações mesmo em áreas onde os espeleotemas não são muito frágeis, dados os níveis de degradação encontrados. Este aspecto deve ser levado em conta quando da abertura de novos roteiros ou mesmo novas cavernas para o espeleoturismo.

Foram identificados subsídios preliminares para os limites aceitáveis de alteração de parâmetros ambientais, em função do tempo de restabelecimento dos padrões habituais a partir dos impactos ocorridos. Os dados coletados permitiram demonstrar a funcionalidade da aplicação de um fator crítico atmosférico – no caso, a temperatura do ar – como indicador de limite de manejo.

O teste-piloto da metodologia de capacidade de carga proposta, feito para a caverna de Santana com dados primários e secundários, permitiu a confirmação de mais uma hipótese, de que os parâmetros espeleoclimáticos e geoespeleológicos fornecem subsídios mínimos para o estabelecimento da capacidade de carga espeleoturística. No caso da caverna de Santana, foi identificada uma capacidade de carga espeleoturística (CCC_T) máxima de 1344 visitas/dia. Posteriormente, os testes de hipóteses e as opções de manejo levaram à sugestão da adoção de uma capacidade de carga espeleoturística inicial de 378 visitas/dia, em grupos de até 18 pessoas em finais de semana e feriados e de 336 visitas/dia, em grupos de até 24 pessoas em dias úteis. O intervalo de tempo sugerido para a entrada dos grupos é de 30min nos dias úteis e de 20min nos finais de semana e feriados. Todavia, intervalos menores, de até 7min 30s, são aceitos sob o ponto de vista atmosférico, permitindo a adoção de políticas de manejo em função das necessidades diárias, como por exemplo, quando da chegada de grupos pequenos em dias de baixo volume de visitação, aproveitando tais oportunidades para estudar novas formas de manejo e capacidade de carga.

Os resultados obtidos ilustram a necessidade de se encarar a capacidade de carga como uma ferramenta de manejo, onde a flexibilidade dos resultados é importante para a identificação de limites mais adequados de uso. Assim, a metodologia não remete à limitação fixa dos volumes de visitação, mas sim, a um intervalo dinâmico, em acordo com as respostas obtidas em testes de campo. Tais respostas podem ser diferentes em função da sazonalidade climática e turística,

gerando níveis distintos de capacidade de carga espeleoturística para cada época do ano ou temporada de visitação. Sob o ponto de vista filosófico-ambiental, os resultados obtidos também forneceram base para outra conclusão: não se deve esperar que o ambiente forneça respostas matemáticas e lineares para o problema da gestão turística, eximindo gestores e pesquisadores de sua responsabilidade. A existência de uma possibilidade ampla de visitação reforça a necessidade de adoção de práticas científicas e medidas de longo prazo, tomando as respostas dos parâmetros ambientais mensuráveis como balizadores estratégicos para a racionalidade nas práticas responsáveis do manejo do turismo em uma caverna.

Especificamente sobre o uso da temperatura do ar na capacidade de carga, abriu-se também novo campo de possibilidades, contrariando o paradigma vigente de impacto zero que permeia o uso deste parâmetro em estudos de mesma natureza. Com isso, ressalta-se a necessidade de contextualizar todo e qualquer estudo de capacidade de carga em cada caverna ou mesmo em diversos roteiros em uma mesma caverna. A determinação da capacidade de carga espeleoturística requer um estudo amplo, com base mínima incluindo um ciclo de chuva-estiagem. O emprego do método proposto em dados coletados em periodicidade inferior (semanas, meses) não é recomendado, exceto para a formulação de hipóteses exploratórias e estudo, mas não para práticas de manejo turístico-ambiental-espeleológico.

Desta forma, todos os aspectos ressaltados permitiram concluir, por fim, que a identificação dos limites temporais aceitáveis de alterações nos parâmetros atmosférico, e sua relação com a capacidade de resiliência e a manutenção do estado estacionário das diferentes zonas atmosféricas de uma caverna, forneceram as respostas necessárias para a obtenção da capacidade de carga espeleoturística.

A person wearing a headlamp is in a dark cave, looking at a wall covered in glowing mineral deposits. The deposits are vertical, columnar structures that emit a bright, yellowish-white light. The person is in the lower-left corner, and the rest of the cave is in deep shadow.

REFERÊNCIAS

Efeito luminoso
de rara beleza
em cortinas no salão das Flores.

REFERÊNCIAS

ABRAHAM, R. The misuse of mathematics. In: EMMER, M.; QUARTERONI, A. (Eds.) **Mathknow: Mathematics, applied sciences and real life**. Milão: Springer, 2009. v.3, p.1-8.

ALBERIGI, S. **Avaliação da exposição ao ^{222}Rn nas cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR)**. 2006. 63 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

ALBERIGI, S. **Sobre a influência de fatores ambientais nos níveis de radônio em cavernas dos Parques Estaduais do Vale do Ribeira, SP e avaliação do equilíbrio radioativo e fator de equilíbrio entre radônio e seus descendentes**. 2011. 105 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

ALBERIGI, S.; PECEQUILO, B.R.S. Caves of Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP, Brazil: a study of indoor radon levels and impact of seasonal temperature and humidity. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, 2007, Santos, SP. **Proceedings**. Santos: ABEN, 2007. p. 1-6.

ALBERIGI, S.; PECEQUILO, B.R.S. Níveis de Radônio em cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR). **Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, Campinas, v.1, n.1, p.43-55, 2008.

ANDRADE, S.; ULBRICH, H.H.; JANASI, V.A.; NAVARRO, M.S. The determination of total hydrogen, carbon, nitrogen and sulfur in silicates, silicate rocks, soils and sediments. **Geostandards and Geoanalytical Research**, v.33, n.32, p.337-345, 2009.

ASSUNÇÃO, L.G. Exploração da caverna da Marreca. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v.8, p.23-25, 1976.

AULER, A. Karst areas in Brazil and the potential for major caves: an overview. **Bol. Soc. Venezolana Espeleología**, v.36, p.1-18, 2002.

AULER, A.; RUBBIOLI, E.; BRANDI, R. **As grandes cavernas do Brasil**. Belo Horizonte: GBPE, 2001. 150 p.

AYUB, S. **Aplicação do corante traçador rhodamina-WT no estudo hidrológico e hidrogeológico dos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo, Município de Iporanga, Estado de São Paulo**. 1998. 104p. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998.

AYUB, S. Aplicação de rhodamina-WT no estudo hidrológico de sistemas cársticos em Iporanga, estado de São Paulo. **Espeleo-Tema**, Campinas, v.19, p.1-14, 2007.

BADINO, G. Cave temperatures and global climatic change. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.33, n.1, p.103-114, 2004.

BADINO, G. The cueva de los Cristales micrometeorology. In: WHITE, W. (Ed.) **INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY**, 15, 2009, Kerrville. **Proceedings**. Kerrville: UIS/NSS, 2009a, v.3, p.1407-1412.

BADINO, G. The legend of carbon dioxide heaviness. **Journal of Cave and Karst Studies**, Huntsville, v.71, n.1, p.100-107, 2009b.

BADINO, G. Underground meteorology – “What’s the weather underground?”. **Acta Carsologica**, Postojna, v.39, n.3, p.427-448, 2010.

BAILEY, W.G. Microclimatology. In: OLIVER, J.E. (Ed.) **Encyclopedia of world climatology**. Dordrecht: Springer, 2005. p.486-499.

BAKER, A.; GENTY, D. Environmental pressures on conserving cave speleothems: effects of changing surface land use and increased cave tourism. **Journal of Environmental Management**, v.53, p.165-175, 1998.

BARBIERI, A.J. **Depósitos minerais secundários das cavernas Santana, Pérolas e Laje Branca, Município de Iporanga – São Paulo**. 1993. 96 p. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993.

BASKAR, S.; BASKAR, R.; LEE, N.; THEPHILUS, P.K. Speleothems from Mawsmi and Krem Phyllut caves, Meghalaya, India: some evidences on biogenic activities. **Environmental Geology**, v.57, p.1169-1186, 2009.

BASTIAN, F.; ALABOUVETTE, C. Lights and shadows on the conservation of a rock art cave: the case of Lascaux cave. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.38, n.1, p.55-60, 2009.

BATIOT-GUILHE, C.; SEIDEL, J.L.; JOURDE, H.; HÉBRARD, O.; BAILLY-COMTE, V. Seasonal variations of CO₂ and ²²²Rn in a Mediterranean sinkhole – spring (Causse d'Aumelas, SE France). **International Journal of Speleology**, Bologna, v.36, n.1, p.51-56, 2007.

BATISTUCCI, N.L.N. **Mapeamento geoespeleológico da caverna Água Suja: desenvolvimento de métodos.** 1988. 45 p. Relatório de iniciação científica (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1988.

BELLA, P. Negative anthropogenic impacts on the cave environment: geocological approach and implication for show caves protection. In: BELLA, P.; GAZIK, P.; VLCEK, L. (Eds.). INTERNATIONAL SHOW CAVES ASSOCIATION CONGRESS, 6, 2010, Liptovsky Mikulas. **Abstracts Excursion Guide.** Liptovsky Mikulas: Slovak Caves Administration, 2010. p.12-13.

BERTOLANI, M.; CIGNA, A.A. Activity of the scientific commission of “grotta Grande del Vento” (Genga, Ancona, Central Italy). **International Journal of Speleology**, Bologna, v.23, n.1/2, p.51-60, 1994.

BERTRAN, C.A.; MARQUES, C.S.T.; BENVENUTTI, L.H. Temporal evolution of soot particles from C₂H₂/O₂ combustion in a closed chamber. **Journal of Brazilian Chemistry Society**, v.13, n.1, p.47-53, 2002.

BOCH, R.; SPÖTL, C.; FRISIA, S. Origin and paleoenvironmental significance of lamination in stalagmites from Katerloch cave, Austria. **Sedimentology**, v.58, p.508-531, 2011.

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.J.C.; 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, Brasília. **Proceedings.** Brasília: UIS/SBE, 2001. p. 299-300.

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.

BOULLON, R. **Planificación del espacio turístico.** Ciudad del México: Trillas, 1985. 245p.

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.

BOURGES, F.; GENTHON, P.; MANGIN, A.; D'HULST, D. Microclimates of l'Aven d'Ornac and other French limestone caves (Chauvet, Esparros, Marsoulas). **International Journal of Climatology**, v.26, p.1651-1670, 2006.

BRANDI, R. Ricardo Krone e Lourenço Granato: influências na história da espeleologia paulista no final do século XIX e início do século XX. **O Carste**, Belo Horizonte, v.20, n.1, p.36-61, 2008.

BRANDI, R.; CAMARGO, A. Los tatus e a operação tatus. **O Carste**, Belo Horizonte, v.19, n.2, p.26-41, 2007.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Ministério da Indústria, Comércio e Turismo. IBAMA. EMBRATUR. **Diretrizes para uma política nacional de ecoturismo**. Brasília: EMBRATUR, 1994. 48 p.

BRASIL. **Lei n. 9985 de 18 de julho de 2000**. Sistema Nacional de Unidades de Conservação. Disponível em <<https://www.presidencia.gov.br>>. Acesso em: 4 dez. 2005.

BRILHA, J. Geoconservation and protected areas. **Environmental Conservation**, v.29, n.3, p.273-276, 2002.

BUCKLEY, R. Geotourism. **Annals of Tourism Research**, v.33, n.2, p.583-585, 2006.

BUECHER, R.H. Microclimate study of Kartchner caverns, Arizona. **Journal of Cave and Karst Studies**, Huntsville, v.61, n.2, p.108-120, 1999.

CABROL, P. Protection of speleothems. In: HILL, C.A.; FORTI, P. **Cave minerals of the world**. Huntsville: NSS, 1997. p. 294-300.

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.

CAMARGO, A.L. **Proposta de método de determinação da capacidade de carga de visitação turística para as cavernas da região de Bulhas D'Água e Vale dos Buenos no Parque Estadual de Intervalos e no Parque Estadual e Turístico do Alto Ribeira, Estado de São Paulo**. 2008. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão Estratégica e Meio Ambiente) – Instituto Mauá de Tecnologia, São Paulo. 2008.

CAMPANHA, G.A. da C. **Tectônica neoproterozóica no alto e médio Vale do Ribeira, estados de São Paulo e Paraná**. São Paulo. 1991. 296 p. Tese (Doutorado em Geotectônica), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo.

CAMPANHA, G.A. da C.; SADOWSKI, G.R. Tectonics of the southern portion of the Ribeira Belt (Apiáí Domain). **Precambrian Research**, v.98, n.1, p.31-51, 1999.

CAMPOS, M.P.; PECEQUILO, B.R.S.; ALBERIGI, S.; MAZZILLI, B.P. Thoron exposure among tour guides in southern Brazilian show caves. **International Journal Low Radiation**, v.3, n.2/3, p.217-223, 2006.

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.

CARRANZA, G.Q.; FERNÁNDEZ, I.B.; PORRAS, J.J.; CASCO, M.E.; ARANA, I.G.; MAHECHA, S.L.; CÉSPEDES, J.V. **Estudio de capacidad de carga para la caverna Terciopelo em el Parque Nacional Barra Honda**. 2006. 43 p. Proyecto Final de Avances en Conservación Biológica (Mestrado en Manejo de Recursos Naturales) – Universidad Estatal a Distancia, San José. 2006.

CARRASCO, F.; VADILLO, I.; LIÑÁN, C.; ANDREO, B.; DURÁN, J.J. Control of environmental parameters for management and conservation of Nerja cave (Malaga, Spain). **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.31, n.1, p.105-122, 2002.

CARREÑO, R.; URBANI, F. Observaciones sobre las espeleotemas del sistema Roraima sur. **Bol. Soc. Venezolana Espeleología**, v.38, p.28-33, 2004.

CARVALHO, S.M. Microclimatologia subterrânea da gruta Olhos d'Água (Castro, PR). In: DITZEL, C. de H.M.; SAHR, C.L.L. **Espaço e cultura: Ponta Grossa e os Campos Gerais**. Ponta Grossa: UEPG, 2001. p.443-462.

CEBALLOS-LASCURAIN, H. **Ecoturismo, naturaleza y desarrollo sostenible**. Cidade do México: Diana, 1998. 172 p.

CECAV – CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS. **Termo de referência para o plano de manejo espeleológico de cavernas com atividades turísticas implantadas**. Brasília: CECV, 2006. 13 p.

CERVANTES, C.A.E. El mito de la serpiente de las grutas. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 13, 2001, Brasília. **Proceedings**. Brasília: SBE, 2001. Vol. 02. p.76-99.

CÉSAR JÚNIOR, N. da S. Estudo meteorológico do laboratório subterrâneo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 14, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte: SBE/CPG, 1980. p.140-147.

CHANG, S.J.; JEONG, G.Y.; KIM, S.J. The origin of black carbon on speleothems in tourist caves in South Korea: Chemical characterization and source discrimination by radiocarbon measurement. **Atmospheric Environment**, v.42, p.1790-1800, 2008.

CHOPPY, J.; CIGNA, A.A. Proposition pour une etude micro-climatique en zones souterraines profondes. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.23, n.1/2, p.91-93, 1994.

CHRISTOFOROU, C.S.; SALMON, L.G.; CASS, G.R. Air exchange within the Buddhist cave temples at Yungang, China. **Atmospheric Environment**, v.30, n.23, p. 3995-4006, 1996.

CIFUENTES-ARIAS, M. **Determinación de capacidad de carga turística en áreas protegidas**. Turrialba: CATIE, 1992. 28 p.

CIFUENTES-ARIAS, M.; MESQUITA, C.A.B.; MÉNDEZ, J.; MORALES, M.E.; AGUILAR, N.; CANCINO, D.; GALLO, M.; RAMIREZ, C.; RIBEIRO, N.; SANDOVAL, E.; TURCIOS, M. **Capacidad de carga turística de las áreas de uso público del Monumento Nacional Guayabo, Costa Rica**. Turrialba: CATIE/WWF, 1999. 99 p.

CIGNA, A. A. An analytical study of air circulation in caves. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.3B, n.1/2, p.42-54, 1967.

CIGNA, A.A. Environmental management of tourist caves: the examples of Grotta di Castellana and Grotta Grande del Vento, Italy. **Environmental Geology**, Berlin, v.21, p.173-180, 1993.

CIGNA, A. A. Modern trend in cave monitoring. **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.31, n.1, p.35-54, 2002a.

CIGNA, A. A. Monitoring of caves: conclusions and recommendations. **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.31, n.1, p.175-177. 2002b.

CIGNA, A.A. Climate of caves. In: GUNN, J. (Ed.) **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Taylor & Francis, 2004. p.467-475.

CIGNA, A. A. Radon in caves. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.34, n.1/2, p.1-18, 2005.

CIGNA, A.A. International Show Caves Association draft management guidelines for show caves. In: BELLA, P.; GAZIK, P.; VLCEK, L. (Eds.). INTERNATIONAL SHOW CAVES ASSOCIATION CONGRESS, 6, 2010, Liptovsky Mikulas. **Abstracts Excursion Guide**. Liptovsky Mikulas: Slovak Caves Administration, 2010. p.36-39.

CIGNA, A.A.; BURRI, E. Development, management and economy of show caves. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.29, n.1, p.1-27, 2000.

CIGNA, A.A.; CHOPPY, J. The climate in deep zones of karst. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL CHANGES IN KARST AREAS, 1, Padova, Itália. **Proceedings of...** Padova: UIS, 1991. p. 305-6.

CIGNA, A.A.; CHOPPY, J. The climate in deep zones of karst. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL CHANGES IN KARST AREAS, 1, 2001, Padova. **Proceedings of...** Padova: IGU/UIS, 2001. p.305-306.

CIGNA, A.A.; FORTI, P. The speleogenetic role of air flow caused by convection. 1st. contribution. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.15, p.41-52, 1986.

CIGNA, A.A.; FORTI, P. The environmental impact assessment of a tourist cave. In: UIS (ed.) CAVE TOURISM INTERNATIONAL SYMPOSIUM AT-170 ANNIVERSARY OF POSTOJNSKA JAMA, 1988, Postojna (Yugoslavia), **Proceedings**. Postojna: UIS, 1988. p. 29-38.

COLLAZO,V.O.; ORTIZ DE PINEDO, J.L.; RUIZ, R.M. Estudio del microclima de la cueva de Mendukilo. Astiz. Navarra. Periodo Enero –Diciembre 2006. **Sociedad de ciências espeleológicas Alfonso Antxia**. Disponível em <<http://www.sociedadalfonsoantxia.org/Mendukilo.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2007a. p.1-47.

COLLAZO,V.O.; ORTIZ DE PINEDO, J.L.; RUIZ, R.M. Estudio del microclima de la cueva Pozalagua. Período de medición 2004-2006. **Sociedad de ciências espeleológicas Alfonso Antxia**. Disponível em <<http://www.sociedadalfonsoantxia.org/Estudio%20del%20microclima%20de%20la%20cueva%20de%20%20Pozalagua%202004-2006.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2007b. p.1-53.

COLLET, G.C. Pérolas 1971. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v.10, p.16-18, 1976a.

COLLET, G.C. Programa de trabalho para o laboratório subterrâneo de pesquisas – período 1976 – SBE. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v.7, p.7-8, 1976b.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 347 de 10 de setembro de 2004. In: **Diário Oficial da União**, Brasília, ed.176, seção 01, p.54. 13 set. 2004.

COSTA JÚNIOR, E.P.D. **Abismo Anhumas (MS 04)**: plano de manejo espeleológico. rev. e ampl. Bonito: Abismo Anhumas, 2004. . 167 p.

COSTA, T.C. e C. da.; UZEDA, M.D.; FIDALGO, E.C.C.; LUMBRERAS, J.F.; ZARONI, M.J.; NAIME, U.J.; GUIMARÃES, S.P. Vulnerabilidade ambiental em sub-bacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro por meio de integração temática da perda de solo (USLE), variáveis morfométricas e o uso/cobertura da terra. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, Florianópolis. **Anais do XIII...** Florianópolis: INPE, 2007. p.2493-2500.

COURA, J.F.; HASHIZUME, B.R. Província espeleológica de Januária. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 10, 1975, Ouro Preto. **Anais do X...** Ouro Preto: SBE/SEE, 1975. p.41-52.

CRAVEN, S.A.; SMITH, B.J. Radon in caves: clinical aspects. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.35, n.2, p.93-101, 2006.

CRUZ JÚNIOR, F.W. da. **Estudo paleoclimático e paleoambiental a partir de registros geoquímicos quaternários em espeleotemas das regiões de Iporanga (SP) e Botuverá (SC)**. 2003. 134 p. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.

CRUZ JÚNIOR, F.W. da.; BURNS, S.J.; KARMANN, I.; SHARP, W.D.; VUILLE, M.; CARDOSO, A.O.; FERRARI, J.A.; DIAS, P.L.S.; VIANA JÚNIOR, O. Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil. **Nature**, v.434, n.3, p.63-66, 2005.

CUCCHI, F.; FORTI, P.; MARINETTI, E.; ZINI, L. Recent developments in knowledge of the hydrogeology of the classical karst. **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.29, n.1, p.55-78, 2000.

CULVER, D.C.; SKET, B. Biological monitoring in caves. **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.31, n.1, p.55-64, 2002.

DAVIS, O.K. Pollen and other microfossils in Pleistocene speleothems, Kartchner caverns, Arizona. **Journal of Cave and Karst Studies**, Huntsville, v.61, n.2, p.89-92, 1999.

DELGADO, M. Análise da metodologia criada por Miguel Cifuentes referente à capacidade de carga turística. **Turismo em Análise**, São Paulo, v.18, n.1, p.73-93, 2007.

DE WAELE, J.; FORTI, P.; PICOTTI, V.; LUCAZINI. Halite macrocrystalline stalactites of the Atacama caves (Chile). In: WHITE, W. (Ed.) INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15, 2009, Kerrville. **Proceedings**. Kerrville: UIS/NSS, 2009, v.1, p.296-299.

DIEGUES, A.C.S. **O mito moderno da natureza intocada**. 3.ed. São Paulo: Hucitec, 2000. 169 p.

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, p.303-312, 2003.

DOMÍNGUEZ-VILLAR, D.; FAIRCHILD, I.J.; CARRASCO, R.M.; PEDRAZA, J.; BAKER, A. The effect of visitors in a touristic cave and the resulting constraints on natural thermal conditions for paleoclimate studies (Eagle cave, central Spain). **Acta Carsologica**, Postojna, v.39, n.3, p.491-502, 2010.

DOMINGOS, M.D.; SANTOS, A.C.A. dos. **Cavernas**. 3.ed. São Paulo: Ática, 2000. 48 p.

DOORNE, S. Caves, culture and crowds: carrying capacity meets consumer sovereignty. **Journal of Sustainable Tourism**, v.8, n.2, p.116-130, 2000.

DRAGOVITCH, D.; GROSE, J. Impact of tourism in carbon dioxide levels at Jenolan caves, Australia: an examination of microclimatic constraints on tourist cave management. **Geoforum**, v.21, n.1, p.111-120, 1990.

DREYBRODT, W. Carbonate minerals: precipitation. In: GUNN, J. (Ed.) **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Taylor & Francis, 2004a. p.383-387.

DREYBRODT, W. Dissolution: carbonate rocks. In: GUNN, J. (Ed.) **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Taylor & Francis, 2004b. p.608-616.

DREYBRODT, W.; GRABROVSEK, F.; PERNE, M. Condensation corrosion: a theoretical approach. **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.34, n.2, p.317-348, 2005.

DUBLYANSKY, V.N.; DUBLYANSKY, Y.V. The problem of condensation in karst studies. **Journal of Cave and Karst Studies**, Huntsville, v.60, n.1, p.3-17, 1998.

ENVIRONMENTAL POLLUTION AGENCY. **A lexicon of cave and karst terminology with special reference to environmental karst hydrology**. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency/EPA, 2002. Disponível em: <<http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=54964>>. Acesso em: 19 jun. de 2006.

ERASO, A. La corrosión climática em las cavernas. **Boletín Geológico y Minero**, v.80, n.6, p.564-581, 1969.

ERCOLE, C.; CACCHIO, P.; CAPPuccio, G.; LEPIDI, A. Deposition of calcium carbonate in karst caves: role of bacteria in Stiffe's cave. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.30, n.1, p.69-79, 2001.

FAIMON, J.; STELEL, J.; SAS, D. Anthropogenic CO₂-flux into cave atmosphere and its environmental impact: a case study in the Cisarska cave (Moravian Karst, Czech Republic). **Science of the Total Environment**, v.369, p.231-245, 2006.

FAIRCHILD, I.J.; McMILLAN, E.A. Speleothems as indicator of wet and dry periods. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.36, n.2, p.69-74, 2007.

FALEIROS, F.M.; CAMPANHA, G.A. da C. Petrografia e microestruturas de tectonitos da zona de cisalhamento Ribeira, Vale do Ribeira, SP e PR: implicações no zoneamento metamórfico e estrutural do Supergrupo Açungui e unidades correlatas. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.34, n.3, p.419-430, 2004.

FERNÁNDEZ-CORTÉS, A. **Caracterización microclimática de cavidades y análisis de la influencia antrópica de su uso turístico**. 2004. 424 p. Tese (Doutorado em Hidrogeologia e Química Analítica) – Universidad de Almería, Almería. 2004.

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, 2006a.

FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; CALAFORRA, J.M.; SÁNCHEZ-MARTOS, F. Spatiotemporal analysis of air condition as a tool for the environmental management of a show cave (Cueva del Agua, Spain). **Atmospheric Environment**, v.40, p. 7378-7394, 2006b.

FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; CALAFORRA, J.M.; JIMÉNEZ-ESPINOSA, R.; SÁNCHEZ-MARTOS, F. Geostatistical spatiotemporal analysis of air temperature as an aid to delineating thermal stability zones in a potential show cave: implications for environmental management. **Journal of Environmental Management**, v.81, p.371-383, 2006c.

FERRARI, J.A. **A dinâmica da drenagem subterrânea nos planaltos cársticos do rio Betari, Vale do Ribeira – SP**. Projeto Fapesp 2009/05115-5. São Paulo, 2009.

FERRARI, J.A.; KARMANN, I. Comportamento hidrodinâmico de sistemas cársticos na bacia do rio Betari, município de Iporanga-SP. **Geologia USP Série Científica**, São Paulo, v.8, n.1, p.1-13, 2008.

FIGUEIREDO, L.A.V. de. Cavernas brasileiras e seu potencial ecoturístico: um panorama entre a escuridão e as luzes. In: VASCONCELOS, F.P. (org.) **Turismo e meio ambiente**. Fortaleza: UECE, 1998. p.186-200.

FIGUEIREDO, L.A.V. de. “**O ‘meio ambiente’ prejudicou a gente...**”: políticas públicas e representações sociais de preservação e desenvolvimento; desvelando a pedagogia de um conflito no Vale do Ribeira (Iporanga-SP). 1999. 489 p. Dissertação (Mestrado em Educação), Faculdade de Educação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1999.

FIGUEIREDO, L.A.V. de. **Cavernas como paisagens racionais e simbólicas**: imaginário coletivo, narrativas visuais e representações da paisagem e das práticas espeleológicas. 2010. 466 p. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.

FIGUEIREDO, L.A.V. de; CORNETTA, A.; MORADO, M. dos S.; ZAMPAULO, R. de A.; ANTICO, S.S.. Tourism in São Paulo caves (Brazil): management of the natural heritage, public use and environmental education programs. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 13, 2001, Brasília. **Proceedings**. Brasília: UIS/FEALC/SBE, 2001. p.230-S6.

FIGUEIREDO, M.C.B.; TEIXEIRA, A.S.; ARAÚJO, L. de F.P.; ROSA, M.F.; PAULINO, W.D.; MOTA, S.; ARAÚJO, J.C. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Paulo, v.12, n.4, p.399-409, 2007.

FOGAÇA, I. de F. **Estudo das transformações da estrutura física do bairro da Serra no Município de Iporanga/SP em decorrência da atividade turística**. 2006. 192 p. Dissertação (Mestrado em Turismo e Hotelaria) – Universidade do Vale do Itajaí, Camboriú. 2006.

FOGAÇA, I. de F. Estudo das transformações da estrutura física do bairro da Serra, entorno do PETAR, em decorrência da atividade turística. **Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, Campinas, v.1, n.1, p.29-42, 2008.

FOKEN, T. **Micrometeorology**. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 306 p.

FORBES, J. Air temperature and relative humidity study: Torgac cave, New Mexico. **Journal of Cave and Karst Studies**, Huntsville, v.60, n.1, p.27-32, 1998.

FORD, D.C. Karst. In: GUNN, J. (Ed.) **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Taylor & Francis, 2004. p.1017-1020.

FORD, D.C.; EWERS, R.O. The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.10, p.213-244, 1978.

FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. 2.ed. rev. e atual. West Sussex: Wiley, 2007. 562 p.

FORTI, P. Biogenic speleothems: an overview. **International Journal of Speleology**, Bolgna, v.30, n.1, p.39-56, 2001.

FORTI, P. Speleothems (palestra). INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15, 2009, Kerrville. **CD-ROM**. Kerrville: UIS/NSS, 2009.

FORTI, P.; GALLI, E.; ROSSI, A. New rare cave minerals from the Perolas-Santana karst system (São Paulo State, Brazil). **International Journal of Speleology**, Bologna, v.29, n.1, p.127-150, 2000.

FORTI, P.; GALLI, E.; ROSSI, A. The mineralogical study on the cueva de las Velas (Naica, Mexico). **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.36, n.3, p.379-388, 2007.

FOXALL, K. **Acetylene toxicall overview**. s.l.: Health Protection Agency, 2009. Disponível em: <http://www.hpa.org.uk/web/HPAwebFile/HPAweb_C/1246260034508>. Acesso em: 16.jul.2011.

FREITAS, C.R. de. The role and the importance of cave microclimate in the sustainable use and management of show caves. **Acta Carsologica**, Postojna, v.39, n.3, p.477-489, 2010.

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.

FREITAS, C.R. de; SCHMEKAL, A. Studies of condensation/evaporation processes in the Glowworm cave, New Zealand. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.35, n.2, p.75-81, 2006.

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**, Blumenau, v.10, n.1, p.49-64, 2008.

FUNDAÇÃO FLORESTAL – FUNDAÇÃO PARA A CONSERVAÇÃO FLORESTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO/SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE; INSTITUTO EKOS BRASIL (Coords.) **Plano de manejo espeleológico do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira**. São Paulo: Fundação Florestal, 2010. 765 p.

GALVÃO, V.; STEVAUX, J.C. Impactos ambientales de la actividad turística en los sistemas fluviales: una propuesta metodológica para el alto curso del río Paraná – Porto Rico (Brasil). **Studios y Perspectivas em Turismo**, v.19, p.994-1010, 2010.

GAMS, I. Origin of the term “karst”, and transformation of the classical karst (kras). **Environmental Geology**, Berlin, v.21, n.3, p.110-114, 1993.

GEIGER, R. Microclimatology. In: MALONE T.F. (ed.) **Compendium of meteorology**. Boston: American Meteorological Society, 1951. p. 993-1003.

GEIGER, R. **Das klima der bodennahen luftschicht**: ein lehrbuch de mikroklimatologie. Braunschweig: Vieweg & Sons, 1961. 646 p.

GERARDI, L.H. de O.; SILVA, B.C.N. **Quantificação em geografia**. São Paulo: Difel, 1981. 161 p.

GILLIESON, D. **Caves**: processes, development and management. Cambridge: Blackwell, 1996. 324 p.

GONZÁLEZ; E.L.; ZAVAN, S. da S. Análises físico-químicas e bacteriológicas em águas provenientes de algumas cavernas do Alto Ribeira, SP. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v.15, p.43-52, 1986.

GORBUSHINA, A.A. Life on the rocks. **Environmental Microbiology**, v.9, n.7, p.1613-1631, 2007.

GRAEFE, A.R., KUSS, F.R.; VASKE, J.J. **Visitor impact management**: the planning framework. Washington: National Parks and Conservation Association, 1990. 105 p.

GPME – GRUPO PIERRE MARTIN DE ESPELEOLOGIA. **Mapa da caverna de Santana**. São Paulo: GPME, 2009. 1 mapa. Escala 1:500.

GUIMARÃES, J.E.P. Grutas calcárias. **Boletim do Instituto de Geografia e Geologia da Secretaria de Agricultura**, São Paulo, n.47, p.9-70, 1966.

GUSSO, G.L.N. Complexo Alambari/1974. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v.10, p.15-16, 1976.

GUTJAHR, M.R.; TARIFA, J.R. Critérios relacionados a compartimentação climática de bacias hidrográficas: a bacia do rio Ribeira de Iguape-SP. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 5, 1993, São Paulo. **Anais**. São Paulo: USP, 1993. p.447-449.

GUTJAHR, M.R.; TARIFA, J.R. A abordagem sinótica em estudos de compartimentação climática. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 6, 1995, Goiânia. **Anais do....** Goiânia: UFG, 1995. p.44-48.

HAKL, J.; CSIGE, I.; HUNYADI, I.; VÁRHEGYI, A.; GÉCZY, Z. Radon transport in fractured porous media – experimental study in caves. **Environmental International**, v.22, n.1, p.S433-S437, 1996.

HAMILTON-SMITH, E. Monitoring visitor experience and environmental conditions at Jenolan caves, New South Wales, Austrália. In: STITT, R.R. CAVE AND KARST MANAGEMENT SYMPOSIUM, 13, Bellingham. **Proceedings of...** NSS: Bellingham, 1997. p.87-91.

HASUI, Y; CARNEIRO, C. D. R; COIMBRA, A. M. The Ribeira folded belt. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.15, n.4, p.257-262, 1975.

HEATON, T. Caves: a tremendous range in energy environments on earth. **National Speleological Society News**, Huntsville, v.08, n.44, p.301-304, 1986.

HILL, C.A.; FORTI, P. The classification of cave minerals and speleothems. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.24, n.1, p.77-82, 1995.

HILL, C.A.; FORTI, P. **Cave minerals of the world**. 2.ed. Huntsville: NSS, 1997. 464 p.

HOENEN, S.; MARQUES, M.D. Adaptação temporal e o ambiente cavernícola: uma interpretação. **Biotemas**, v.13, n.1, p.129-144, 2000.

HOSAKA, A.M. da S. Unidades de conservação: aspectos históricos e conceituais. In: PHILIPPE JR., A.; RUSCHMANN, D.V.M. (Eds.) **Gestão ambiental e sustentabilidade no turismo**. Barueri: Manole, 2009. p.263-300.

HOYOS, M.; SOLER, V.; CAÑEVERAS, 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**, Berlin, v.33, n.4, p.231-242, 1998.

HROMNÍČ, C.A. Karst, kras or karašattu: whence the name? **Cave and Karst Science**, v.28, n.2, p.79–88, 2001.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE. **Roteiro metodológico de planejamento**: parque nacional, reserva biológica, estação ecológica. Brasília: IBAMA, 2002. 136 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha municipal digital do Brasil**. Brasília: IBGE, 2005. Disponível em

<ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas/malhas_digitais/municipio_2005/E2500/Documentacao_Tecnica>. Acesso em: 15.jul.2010.

IGC – INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA USP. **Mapa da caverna de Santana**. São Paulo: IGc/USP, 1991. 1 mapa. Escala 1:500.

JAMES, J. Tourist caves: air quality. In: GUNN, J. (Ed.) **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Taylor & Francis, 2004a. p.1561-1563.

JAMES, J. Carbon dioxide-enriched cave air. In: GUNN, J. (Ed.) **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Taylor & Francis, 2004b. p.376-378.

JAMES, J. Condensation corrosion. In: GUNN, J. (Ed.) **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Taylor & Francis, 2004c. p.492-494.

KARMANN, I. **Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto Vale do Rio Ribeira de Iguape, Sudeste do estado de São Paulo**. 1994. 228 p. Tese (Doutorado em Geoquímica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1994.

KARMANN, I.; SÁNCHEZ, L.E. Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil. **Espeleo-Tema**, Monte Sião, v.13, p.105-167, 1979.

KARMANN, I.; SANCHEZ, L. E. Speleological provinces in Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 9, 1986, Barcelona. **Anais**. Barcelona: UIS, 1986.

KARMANN, I.; FERRARI, J.A. Carste e cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M.L.C. (Edits.) **Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil**. 1.ed. Brasília: DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), 2002. p.401-413.

KARMANN, I.; SALLUN FILHO, W. Paisagens subterrâneas do Brasil. **Ciência Hoje**, v.40, n.235, p.18-25, 2007.

KASHIMA, N.; IRIE, T.; KINOSHITA, N. Diatom, contributors of coralloid speleothems from Togawa-Sakaidani-Do cave in Miyazaki prefecture, central Kyushu, Japan. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.16, p.95-100, 1987.

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.

KINOSHITA, A.; KARMANN, I.; CRUZ JÚNIOR, F.W. da; GRAEFF, C.F.O.; BAFFA, O. K-band ESR spectra of calcite stalagmites from southeast and south Brazil. **Applied Radiation and Isotopes**, v.62, p.247-250, 2005.

KIRCHGÄSSNER, G.; WOLTERS, J. **Introduction to modern time series analysis**. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 274p.

KNECHT, T. Formações estruturais, particularmente karsticas do município de Apiaí (Estado de S. Paulo). **Geografia**, São Paulo, v.1, n.1, p.98-109, 1935.

KOWALCZK, A.J.; FROLICH, P.N. Cave air ventilation and CO₂ outgassing by radon-222 modeling: how fast do caves breathe? **Earth and Planetary Science Letters**, v.289, p.209-219, 2010.

KRANJC, A. Kras, Slovenia. In: GUNN, J. (Ed.) **Encyclopedia of Caves and Karst Science**. London: Taylor & Francis, 2004. p.1040-1042.

KRANJC, A.; OPARA, B. Temperature monitoring in Skocjanske Jame caves. **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.31, n.1, p.85-96, 2002.

KRÜGER, M.V. A gruta da Tapagem – II parte. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v.25, n.4, p.173-177, 1967.

LABEGALINI, J.A. **Levantamento dos impactos das atividades antrópicas em regiões cársticas – estudo de caso: proposta de mínimo impacto para implantação de infra-estrutura turística na gruta do Lago Azul – Serra da Bodoquena (município de Bonito-MS)**. 1996. 185 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1996.

LABEGALINI, J.A. Problemas ambientais na caverna do Diabo decorrentes da iluminação elétrica. In: RASTEIRO, M.A.; SILVA, L.A. da.; LEVY, M. de O.P.; LUCON, T.N.; RENÓ, R. (Eds). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 29, Ouro Preto. **Anais**. Ouro Preto: SBE/SEE, 2007. p.149-155.

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. Rio Claro: Lab. Geomatématica, 2000. 128 p.

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2.ed. Rio Claro: Edunesp, 2003. 253 p.

LANDIM, P.M.B.; MONTEIRO, R.C.; CORSI, A.C. **Introdução à confecção de mapas pelo software surfer**. Rio Claro: Laboratório de geomatemática, 2002. 29 p.

LARIO, J.; SOLER, V. Microclimate monitoring of Pozalagua cave (Vizcaya, Spain): Application to management and protection of show caves. **Journal of Cave and Karst Studies**, Huntsville, v.72, n.3, p.169-180, 2010.

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.

LEAL, J.R.L.V. Gruta da Água Suja. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v.27, p.37-42, 1969.

LE BRET, M. **Maravilhoso Brasil subterrâneo**. Jundiaí: Japi/SBE, 1995. 204 p.

LENTON, T.M. Gaia and natural selection. **Nature**, v.394, p.439-447, 1998.

LICCARDO, A. Turismo mineral em Minas Gerais, Brasil. **Global Tourism**, Ourinhos, v.3, n.2, p.1-19, 2007.

LIMA, T.F.; MORAES, M.S. de. Contribuições para o desenvolvimento de plano de manejo em ambiente cavernícola – gruta do Maquiné: um estudo de caso. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.14, n.1/2, p.45-53, 2006.

LIÑÁN, C.; VADILLO, I.; CARRASCO, F. Carbon dioxide concentration in air within the Nerja cave (Malaga, Andalusia, Spain). **International Journal of Speleology**, v.37, n.2, p.99-106, 2008.

LINO, C.F. **Vale do Ribeira: alternativa turismo**. 1976. Monografia (Graduação em Arquitetura e Urbanismo), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Mackenzie. São Paulo.

LINO, C F. **Manejo de cavernas para fins turísticos: base conceitual e metodológica**. São Paulo: s.ed., 1988. Mimeo. 41 p.

LINO, C. F. **Cavernas: o fascinante Brasil subterrâneo**. 2.ed. rev e atual. São Paulo: Gaia, 2001. 288 p.

LINO, C.F.; BOGGIANI, P.C.; CORTESÃO, J.; GODOY, N.M.; KARMANN, I. **Projeto grutas de Bonito (MS): diretrizes para um plano de manejo turístico**. São Paulo: MS-TUR/SPHAN/FNPM, 1984. 212 p.

LOBO, H.A.S. **A percepção dos impactos ambientais do ecoturismo no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira e nas comunidades de entorno**. 2004. 96 p. Monografia (Especialização em Gestão e Manejo Ambiental em Sistemas Florestais) – Departamento de Conservação Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2004.

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. **O lado escuro do paraíso: espeleoturismo na Serra da Bodoquena**. 2006. 166 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Aquidauana. 2006a.

LOBO, H.A.S. Caracterização dos impactos ambientais negativos do espeleoturismo e suas possibilidades de manejo. In: SEMINÁRIO DE PESQUISA EM TURISMO DO MERCOSUL, 4, 2006, Caxias do Sul. **Anais**. Caxias do Sul: UCS, 2006b. p.1-15.

LOBO, H.A.S. Bases para a implantação e manejo de trilhas espeleoturísticas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO E MANEJO DE TRILHAS, 1, Rio de Janeiro. **Anais do...** Rio de Janeiro: UERJ, 2006c. p.1-12.

LOBO, H.A.S. Método para avaliação do potencial espeleoturístico do Parque Nacional da Serra da Bodoquena, MS. **Caderno Virtual de Turismo**, Rio de Janeiro, v.7, n.3, p.99-110, 2007.

LOBO, H.A.S. Ecoturismo e percepção de impactos socioambientais sob a ótica dos turistas no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira – PETAR. **Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, Campinas, v.1, n.1, p.67-76. 2008a.

LOBO, H.A.S. Capacidade de carga real (CCR) da caverna de Santana, PETAR-SP e indicações para o seu manejo turístico. **Geociências**, Rio Claro, v.27, n.3, p.369-385, 2008b.

LOBO, H.A.S. Zoneamento ambiental espeleológico (ZAE): aproximação teórica e delimitação metodológica. **Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, Campinas, v.2, n.2, p.113-129, 2009.

LOBO, H.A.S.; CUNHA, F.M. Perfil dos turistas e percepção de impactos ambientais na gruta do Lago Azul, Bonito-MS. **Hospitalidade**, São Paulo, v.6, n.1, p.34-49, 2009.

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, São Paulo, Brasil. **Resumos expandidos e simples**. São Paulo: Redespeleo, 2007. p.113-122.

LOBO, H.A.S.; ZAGO, S. Impactos ambientais causados pela música e concentração de pessoas em um evento musical na gruta do Morro Preto (PETAR-SP). In: RASTEIRO, M.A.; SARMENTO, R.L. (Eds). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30, Montes Claros. **Anais**. Montes Claros: SBE, 2009. p.107-112.

LOBO, H.A.S.; ZAGO, S. Iluminação com carbureteiras e impactos ambientais no microclima de cavernas: estudo de caso da lapa do Penhasco, Buritinópolis-GO. **Geografia**, Rio Claro, v.35, n.1, p.183-196, 2010.

LOBO, H.A.S.; VERÍSSIMO, C.U.V.; SALLUN FILHO, W.; FIGUEIREDO, L.A.V.; RASTEIRO, M.A. Potencial geoturístico da paisagem cárstica. **Global Tourism**, Ourinhos, v.3, n.2, p.1-20, 2007.

LOBO, H.A.S.; PERINOTTO, J.A. de J.; BOGGIANI, P.C. Espeleoturismo no Brasil: panorama geral e perspectivas de sustentabilidade. **Revista Brasileira de Ecoturismo**, São Paulo, v.1, n.1, p.62-83, 2008.

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, 2009a.

LOBO, H.A.S.; PERINOTTO, J.A. de J.; BOGGIANI, P.C.; ZAGO, S. Eventos musicais causam impactos no microclima de cavernas? Avaliação das alterações na

atmosfera subterrânea da gruta Morro Preto (PETAR, Iporanga-SP). **Geonomos**, Belo Horizonte, v.17, n.1, p.01-10, 2009b.

LOBO, H.A.S.; SALLUN FILHO, W.; VERÍSSIMO, C.U.V.; TRAVASSOS, L.E.P.; FIGUEIREDO, L.A.V. de; RASTEIRO, M.A. Espeleoturismo: oferta e demanda em recente expansão e consolidação no Brasil. In: CASTRO, S.F.L. de; SOUTO, W.; RANGEL, B.B. (Coords.) **Segmentação do turismo**: experiências, tendências e inovações – artigos acadêmicos. Brasília: Ministério do Turismo, 2010a. p.35-58.

LOBO, H.A.S.; MARINHO, M. de A.; TRAJANO, E.; SCALEANTE, J.A.B.; ROCHA, B.N.; SCALEANTE, O.A.F.; LATERZA, F.V. Planejamento ambiental integrado e participativo na determinação da capacidade de carga turística provisória em cavernas. **Turismo e Paisagens Cársticas**, v.3, n.1, p.31-43, 2010b.

LONGHITANO, G.A.; ROCHA, B.N.; ÂNGELO FURLAN, S. Caracterização microclimática da gruta Colorida Parque Estadual de Intervales, SP. In: RASTEIRO, M.A.; SILVA, L.A. da.; LEVY, M. de O.P.; LUCON, T.N.; RENÓ, R. (Eds). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 29, Ouro Preto. **Anais**. Ouro Preto: SBE/SEE, 2007. p.187-193.

LOVELOCK, J. **Gaia**: cura para um planeta doente. São Paulo: Cultrix, 2006. 192 p.

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.

LUETSCHER, M.; LISMONDE, B.; JEANNIN, P.Y. Heat exchanges in the heterothermic zone of a karst system: Monlesi cave, Swiss Jura mountains. **Journal of Geophysical Research**, v.113, p.1-13, 2008.

MANGIN, A. Pour une meilleure connaissance des systems hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. **Journal of Hydrology**, v.67, p.25-43, 1984.

MANGIN, A. Cave management, visitation limits and environmental preserving. In: BELLA, P.; GAZIK, P.; VLCEK, L. (Eds.). INTERNATIONAL SHOW CAVES ASSOCIATION CONGRESS, 6, 2010, Liptovsky Mikulas. **Abstracts Excursion Guide**. Liptovsky Mikulas: Slovak Caves Administration, 2010. p.25.

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.

MANGIN, A.; BOURGES, F.; D'HULST, D. La conservation des grottes ornées: un problème de stabilité d'un système naturel (l'e exemple de la grotte préhistorique de Gargas, Pyrénées françaises). **Sciences de la Terre et des Planètes**, v.328, n.5, p.295-301, 1999.

MARINHO, M. de A. **Estudo morfológico preliminar do sistema cárstico Pérolas-Santana, Iporanga, SP**. 1989. 38 p. Relatório de iniciação científica (Graduação em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1989.

MARINHO, M. de A. **Contribuição à geomorfologia cárstica do Vale do Betari, Iporanga – Apiaí, São Paulo**. 1992. 73 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1992.

MARINHO, M. de A. (Coord.) **Projeto “plano de uso recreativo do PETAR, Iporanga e Apiaí/SP**. São Paulo: WWF/Ing_Ong, 2002. 94p.

MARQUES, C.S.T. **Cinética da reação de radicais em chamas de C₂H₂/O₂ produzidas em câmara fechada**. 2000. 148 p. Tese (Doutorado em Físico-Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2000.

MARRA, R.J.C. **Espeleo turismo: planejamento e manejo de cavernas**. Brasília: WD Ambiental, 2001. 224 p.

MARTIN, P.A. Gruta Sant’Anna – resumo histórico. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v.8, p.26-28, 1976.

MATOS, F.A. A gruta da Tapagem (“Caverna do Diabo”). **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v.24, n.3, p.1-8, 1966.

MEDEIROS, W.D. de A. Ecogoturismo e geoconservação no semi-árido do Rio Grande do Norte: o caso da região do Seridó. **Global Tourism**, Ourinhos, v.3, n.2, p.1-21, 2007.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I.M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206p.

MERTZ, O.; HALSNÆS, K.; OLESEN, J.E.; RASMUSSEN, K. Adaptation to climate change in developing countries. **Environmental Management**, v.43, p.743-752, 2009.

MILANOLO, S.; GRABROVSEK, F. Analysis of carbon dioxide variations in the atmosphere of Srednja Bijambarska cave, Bosnia and Herzegovina. **Boundary-Layer Meteorology**, v.131, p.479-493, 2009.

MILKO, P. Medidas físicas e químicas – expedição Goiás 79. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v.14, p.116-122, 1984.

MINDLIN, B. **Terra grávida**. Rio de Janeiro: Rosa dos tempos, 1999. 278 p.

MOLINA, S. **O pós-turismo**. São Paulo: Aleph, 2003. 130 p.

MONTEIRO, C.A. de F. **A Dinâmica Climática e as Chuvas no Estado de São Paulo – estudo geográfico sob forma de atlas**. São Paulo: Universidade de São Paulo/Instituto de Geografia, 1973. 129 p.

MONTEIRO, C.A. de F. **Geossistemas: a história de uma procura**. São Paulo: Contexto, 2000. 127 p.

MOREIRA, J. Geoturismo: uma abordagem histórico-conceitual. In: REJOWSKI, M.; BASTOS, S.R. (Orgs.). SEMINÁRIO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM TURISMO, 6, 2009, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Anptur/UAM, 2009. p.1-11.

MOREIRA, J.R. de A.; TRAJANO, E. Estudo do topoclíma de cavernas da província espeleológica arenítica Altamita-Itaituba, Pará. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v.16, p.75-82, 1992.

MULEC, J.; KOZI, G. Lampenflora algae and methods of growth control. **Journal of Cave and Karst Studies**, Huntsville, v.71, n.2, p.109-115, 2009.

NASCIMENTO, M.A.L.; AZEVEDO, U.R.; MANTESSO NETO, V. Geoturismo: um novo segmento do turismo no Brasil. **Global Tourism**, Ourinhos, v.3, n.2, p.1-24, 2007.

NASCIMENTO, M.A.L.; AZEVEDO, U.R.; MANTESSO NETO, V. **Geodiversidade, geoconservação e geoturismo**: trinômio importante para a conservação do patrimônio geológico. São Paulo: SBGeo, 2008. 84 p.

NATIONAL PARK SERVICE. U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. **Cave and karst resource management plan Wind cave National Park**. Hot Springs: NPS, 2007. 113 p.

NEIMAN, Z. **A educação ambiental através do contato dirigido com a natureza**. 2007. 138 p. Tese (Doutorado em Psicologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

NGHI, T.; LAN, N.T.; THAI, N.D.; MAI, D.; THANH, D.X. Tourism carrying capacity assessment for Phong Nha – Ke Bang and Dong Hoi, Quang Binh province. **VNU Journal of Science, Earth Sciences**, v.23, p.80-87, 2007.

NOVOMESKI, J. Light-emitting diodes in the illumination of show caves. In: WHITE, W. (Ed.) INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15, 2009, Kerrville. **Proceedings**. Kerrville: UIS/NSS, 2009, v.3, p.2119.

NOVOMESKI, J. Did we find a miracle light source? In: BELLA, P.; GAZIK, P.; VLCEK, L. (Eds.). INTERNATIONAL SHOW CAVES ASSOCIATION CONGRESS, 6, 2010, Liptovsky Mikulas. **Abstracts Excursion Guide**. Liptovsky Mikulas: Slovak Caves Administration, 2010. p.28.

NUNES, E.; LUZ, C.S.; ANJOS, D.T. dos; GONÇALVES, A.C.; SOUZA, J.F. de; LOBO, H.A.S. Proposta de indicadores de acessibilidade às cavidades turísticas direcionadas aos portadores de necessidades especiais (PNEs). In: RASTEIRO, M.A.; SARMENTO, R.L. (Orgs.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30, 2009, Montes Claros. **Anais**. Montes Claros: SBE/EPL/Grucav, 2009. p.159-164.

PALMER, A.N. **Cave geology**. Dayton: Cave Books, 2007. 454 p.

PAPAGEORGIU, K.; BROTHERTON, I. A management planning framework based on ecological, perceptual and economic carrying capacity: the case study of Vikos-Aoos National Park, Greece. **Journal of Environmental Management**, v.56, p.271-284, 1999.

PARQUE ESTADUAL TURÍSTICO DO ALTO RIBEIRA – PETAR. FUNDAÇÃO FLORESTAL. **Dados de visitação da caverna de Santana**. Apiaí: PETAR, 2010. 4 p.

PAVIA, F. Influencia de la geomorfologia karstica em las características climáticas de las grutas y abrigos. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 10, 1975, Ouro Preto. **Anais do X...** Ouro Preto: SBE/SEE, 1975. p.227-245.

PEREDO, R.O.; MORENO, M.I.S.; CABAL, P.A.; MAZA, S.S. de la. Preservation of paleolithic cave art in Northern Spain. In: SYMPOSIUM ON LASCAUX AND PRESERVATION ISSUES IN A SUBTERRANEAN ENVIRONMENT, 2009, Paris. **Proceedings of...** Paris: Ministère de la Culture, 2009. p.1-10.

PEREIRA, R.G.F. de A. **Geoconservação e desenvolvimento sustentável na Chapada Diamantina (Bahia – Brasil)**. 2010. 295 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Ciências, Universidade do Minho, Braga. 2010.

PERINOTTO, A.R. da C. Geoturismo nas cuevas basálticas da alta bacia do rio Corumbataí (Município de Analândia/SP). **Global Tourism**, Ourinhos, v.3, n.2, p.1-31, 2007.

PIASECKI, J.; SAWINSKI, T.; STRUG, K.; ZELINKA, J. Selected characteristics of the microclimate of the Demänovská Ice cave (Slovakia). In: ZELINKA, J. (Ed.) INTERNATIONAL WORKSHOP ON ICE CAVES, 2, Liptovsky Mikulas, 2006. **Proceedings**. Liptovsky Mikulas, Slovak Caves Administration, 2006. p.50-61.

PIRES, F.A. Faciologia e análise paleoambiental da seqüência deposicional Furnas-Lajeado (Gr. Açungui), de idade proterozóica. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.21, n.4, p.355-362, 1991.

PIRES, P. dos S. **Dimensões do ecoturismo**. São Paulo: SENAC, 2002. 272 p.

PIVA, E.B. **Documento preparatório para os planos de manejo das cavernas dos Parques Estaduais Turístico do Alto Ribeira (PETAR), Jacupiranga e Intervalos**. São Paulo: Fundação Florestal/SMA, 2006. 46 p.

PFLITSCH, A.; PIASECKI, J. Detection of an airflow system in Niedzwiedzia (Bear) cave, Kletno, Poland. **Journal of Cave and Karst Studies**, v.65, n.3, p.160-173, 2003.

PFLITSCH, A.; PIASECKI, J.; SAWINSKI, T.; STRUG, K.; ZELINKA, J. Development and degradation of ice crystals sediment in Dobsinska ice cave (Slovakia). In: ZELINKA, J. (Ed.) INTERNATIONAL WORKSHOP ON ICE CAVES, 2, Liptovsky Mikulas, 2006. **Proceedings**. Liptovsky Mikulas, Slovak Caves Administration, 2006. p.38-49.

PFLITSCH, A.; WILES, M.; HORROCKS, R.; PIASECKI, J.; RINGEIS, J. Dynamic climatologic processes of barometric cave systems using the example of Jewel cave and wind cave in South Dakota, USA. **Acta Carsologica**, Postojna, v.39, n.3, p.449-462, 2010.

POULSON, T.L.; WHITE, W.B. The cave environment. **Science**, v.165, n.3867, p.971-981, 1969.

PRELOVSEK, M. Influence of meteorology on speleothem deposition: example from Krizna jama, Slovenia. In: WHITE, W. (Ed.) INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15, 2009, Kerrville. **Proceedings**. Kerrville: UIS/NSS, 2009, v.1, p.1643-1649.

PRICE, L. A speleotourism in peninsular Malaysia. **Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, Campinas, v.1, n.2. p.183-187, 2008.

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**, Berlin, v.31 n.3/4, p.142-149, 1997.

QUEEN, J.M. **A discussion and field guide to the geology of Carlsbad caverns**. Carlsbad: NPS, 1981. 64 p.

QUEEN, J.M. Post-drainage evolution of the caves of the Guadalupe mountains, Southeastern New Mexico and West Texas, USA. In: WHITE, W. (Ed.) INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15, 2009, Kerrville. **Proceedings**. Kerrville: UIS/NSS, 2009, v.1, p.964-970.

RABELO, L.; ROCHA, L.F.S.; ZILLI, L.A. Monitoramento climático do ambiente cavernícola para determinação da capacidade de visitação – estudo de caso: gruta de Botuverá-SC. In: WORKSHOP MANEJO DE CAVERNAS, 1, São Paulo. **Palestra**. São Paulo: Redespeleo, 2003. Disponível em: <http://www.redespeleo.org/eventos/manejo/apre/Monitoramento_Botuvera_Luis_Rocha.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2010.

RACOVITA, G. La classification topo-climatique des cavités souterraines. **Travaux de L'Institute de Speologie Emil Racovita**, v.14, p.197-216, 1975.

RASTEIRO, M.A. A problemática da classificação de visitantes de cavernas em unidades de conservação. In: RASTEIRO, M.A.; SILVA, L.A. da.; LEVY, M. de O.P.; LUCON, T.N.; RENÓ, R. (Eds). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 29, Ouro Preto. **Anais**. Ouro Preto: SBE/SEE, 2007. p.239-250.

REHME, F.C. **Espeleotemas como indicadores de conservação ambiental do conjunto Jesuítas-Fadas no Parque Estadual de Campinhos-PR**. 2008. 132 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

REJOWSKI, M.; YASOSHIMA, J.R.; STIGLIANO, B.V.; SILVEIRA, A.S. Desenvolvimento do turismo. In: REJOWSKI, M. (org.) **Turismo no percurso do tempo**. 2.ed. rev. e ampl. São Paulo: Aleph, 2005. p.43-74.

ROCHA, B.N. **Estudo microclimático do ambiente de cavernas, Parque Estadual Intervales, SP**. 2010. 107 p. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.

ROCHA, B.N.; LONGHITANO, G.A.; ÂNGELO FURLAN, S. Levantamento climático-faunístico preliminar da gruta Colorida do Parque Estadual de Intervales, SP. In: RASTEIRO, M.A.; SILVA, L.A. da.; LEVY, M. de O.P.; LUCON, T.N.; RENÓ, R. (Eds). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 29, Ouro Preto. **Anais**. Ouro Preto: SBE/SEE, 2007. p.251-254.

ROSS, J.L.S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n.8, p.63-74, 1994.

RUSCHMANN, D.V. de M. **Turismo e planejamento sustentável: a proteção do meio ambiente**. 11.ed. Campinas: Papirus, 2004. 199 p.

RUSCHMANN, D.V. de M.; PAOLUCCI, L.; MACIEL, N.A.L. Capacidade de carga no planejamento turístico: estudo de caso da Praia Brava – Itajaí frente à implantação do Complexo Turístico Habitacional Canto da Brava. **Revista Brasileira de Pesquisa em Turismo**, v.2, n.2, p.41-63, 2008.

RUSSELL, M.J.; MACLEAN, V.L. Management issues in a Tasmanian tourist cave: potential microclimatic impacts of cave modifications. **Journal of Environmental Management**, v.87, p.474-483, 2007.

SÁ, A.A.; BRILHA, J.; CACHÃO, M.; COUTO, H.; MEDINA, J.; ROCHA, D.; VALÉRIO, M.; RÁBANO, I.; GUTIÉRREZ-MARCO, J.C. Geoparque Arouca: um novo projecto para o desenvolvimento sustentado baseado na conservação e promoção do património geológico. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOLOGIA, 6, 2006, Evora. **Anais**. Evora: Soc. Geologica de Portugal, 2006. p.893-896.

SALLUN, A.E.M.; SALLUN FILHO, W. Geologia em planos de manejo: subsídios para zoneamento ambiental do Parque Estadual Intervales (PEI), Estado de São Paulo. **Geociências**, Rio Claro, v.28, n.1, p.91-107, 2009.

SALLUN FILHO, W.; KARMANN, I. Dolinas em arenitos da Bacia do Paraná: evidências de carste subjacente em Jardim (MS) e Ponta Grossa (PR). **Revista Brasileira de Geociências**, v.37, n.3, p.551-564, 2007.

SÁNCHEZ-MORAL, S.; SOLER, V.; CAÑEVERAS, J.C.; SANZ-RUBIO, E.; VAN GRIEKEN, R.; GYSELS, K. Inorganic deterioration affecting Altamira cave, N Spain: quantitative approach to wall-corrosion (solutional etching) processes induced by visitors. **The Science of the Total Environment**, v.243/244, p.67-84, 1999.

SARBU, S.M.; LASCU, C. Condensation corrosion in Movile cave, Romania. **Journal of Cave and Karst Studies**, Huntsville, v.59 n.3, p.99-102, 1997.

SCALEANTE, J.A.B. **Avaliação do impacto de atividades turísticas em cavernas**. 2003. 82. p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003.

SCALEANTE, J.A.B.; ESPINHA, A.M.L.; LABEGALINI, J.A.; RASTEIRO, M.A.; SCALEANTE, O.A.F.; SCAGGIANTE, V.F. **Relatório final de diagnóstico de turismo para os planos de manejo espeleológico**. São Paulo: Ekos Brasil, 2009. 106 p.

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.

SELF, C. The internal organization of speleothems. **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.33, n.1, p.245-255, 2004.

SELF, C. Which features of the cave environment control the growth of speleothems? In: WHITE, W. (Ed.) INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15, 2009, Kerrville. **Proceedings**. Kerrville: UIS/NSS, 2009, v.1, p.332-337.

SELF, C.; HILL, C.A. How speleothems grow: an introduction to the ontogeny of cave minerals. **Journal of Cave and Karst Studies**, Huntsville, v.65, n.2, p.130-151, 2003.

SELF, C. A. MULLAN, G.J. Rapid karst development in an english quartzitic sandstone. **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.34, n.2 p.415-424, 2005.

SGARBI, M.C. **Metodologia de manejo em cavernas para minimização de impactos ambientais decorrentes de atividade antrópica – Estudo de caso gruta do Chapéu e caverna Santana, Parque Estadual do Alto Ribeira/SP**. 2003. 47 p. Relatório de Iniciação Científica (Graduação em Ciências Biológicas) – Universidade de Mogi das Cruzes, Mogi das Cruzes. 2003.

SILVA, I.R.; BITTENCOURT, A.C. da S.P.; MELLO E SILVA, S.B. de; DOMINGUEZ, J.M.L.; SOUZA FILHO, J.R. de. Nível de antropização x nível de uso das praias de Porto Seguro/BA: subsídios para uma avaliação da capacidade de suporte. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v.8, n.1, p.81-92, 2008.

SILVA, J.R.B. da; PERINOTTO, J.A. de J. O geoturismo na geodiversidade de Paraguaçu Paulista como modelo de geoconservação nas estâncias. **Global Tourism**, Ourinhos, v.3, n.2, p.1-40, 2007.

SILVA, L.A. da. Relatório de excursão – Januária, MG. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 10, 1975, Ouro Preto. **Anais do X...** Ouro Preto: SBE/SEE, 1975. p. 23-40.

SILVA, M.S.; FERREIRA, R.L. Caracterização ecológica de algumas cavernas do Parque Nacional de Ubajara (Ceará) com considerações sobre o turismo nestas cavidades. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.9, n.1, p.59-71, 2009.

SILVA, O.J. da. **Monitoramento da temperatura e umidade e definição de capacidade de carga turística das grutas do Lago Azul e Nossa Senhora Aparecida (Bonito - MS)**. 2003. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais), Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande. 2003.

SIMON, K.S.; PIPAN, T.; CULVER, D.C. A conceptual model of the flow and distribution of organic carbon in caves. **Journal of Cave and Karst Studies**, Huntsville, v.69, n.2, p.279-284, 2007.

SLAVEC, P. Pesquisas do conjunto hidrológico das Areias, município de Iporanga, Estado de São Paulo. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v.8, p.16-22, 1976a.

SLAVEC, P. Abismo de Furnas. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v.10, p.19-24, 1976b.

SBE – SOCIEDADE BRASILEIRA DE ESPELEOLOGIA. Realizações do grupo paulista em 1970. **Espeleo-Tema**, n.1, p.6, 1970.

SBE. Resumo de atividades dos grupos da SBE – ano 1976. **Espeleo-Tema**, n.10, p.28, 1976.

SBE. **Cadastro nacional de cavernas do Brasil (CNC)**. Campinas: SBE, 2010. Disponível em: <<http://www.sbe.com.br>>. Acesso em: 4 jun. 2010.

SONDAG, F.; RUYMBEKE, M.V.; SOUBIÈS, F.; SANTOS, R.; SOMERHAUSEN, A.; SEIDEL, A.; BOGGIANI, P. Monitoring present day climatic conditions in tropical caves using an Environmental Data Acquisition System (EDAS). **Journal of Hydrology**, v.273, p.103-118, 2003.

SONG, L.; WEI, X.; LIANG, F. The influences of cave tourism on CO₂ and temperature in Baiyun Cave, Hebei, China. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.29, n.1, p.77-87, 2000.

SPOLADORE, A. **A geologia e a geoespeleologia como instrumento de planejamento para o desenvolvimento do turismo – o caso de São Gerônimo da Serra/PR**. 2006. 303 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2006.

STANKEY, G.H.; COLE, D.N.; LUCAS, R.C.; PETERSEN, M.E.; FRISSELL, S.S. **The limits of acceptable change (LAC) system for wilderness planning**. Ogden: USDA Forest Service/Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1985. 37 p.

STOEVA, P.; STOEVA, A. Cave air temperature response to climate and solar and geomagnetic activity. **Memorie Della Società Astronomica Italiana**, v.76, p.1042-1047, 2005.

STORCH, H. von; ZWIERS, F.W. **Statistical analysis in climate research**. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 484 p.

STRAHLER, A.N. **The earth sciences**. 2.ed. New York: Harper and Row, 1971. 824 p.

SWARBROOKE, J. **Turismo sustentável: conceitos e impacto ambiental**. 3.ed. Tradução Esther Eva Horovitz. São Paulo: Aleph, 2002. 140 p.

TABOROSI, D.; HIRAKAWA, K.; SAWAGAKI, T. Carbonate precipitation along a microclimatic gradient in a Thailand cave – continuum of calcareous tufa and speleothems. **Journal of Cave and Karst Studies**, Huntsville, v.67, n.1, p.69-87, 2005.

TARHULE-LIPS, R.F.A.; FORD, D.C. Condensation corrosion in caves on Cayman Brac and isla de Mona. **Journal of Cave and Karst Studies**, Huntsville, v.60, n.2, p.84-95, 1998.

TEMPERINI, M.T. O ambiente das grutas. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v.8, p.5-7, 1976.

THOMAS, K. **O homem e o mundo natural: mudanças de atitude em relação às plantas e aos animais, 1500-1800**. Tradução João Roberto Martins Filho. São Paulo: Companhia das letras, 2001. 454 p.

TOOMEY III, R.S.; OLSON, R.A.; KOVAR, S.; ADAMS, M.; WARD, R.W. Relighting Mammoth cave's new entrance: improving visitor experience, reducing exotix plant growth, and easing maintenance. In: WHITE, W. (Ed.) INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15, 2009, Kerrville. **Proceedings**. Kerrville: UIS/NSS, 2009, v.2, p.1223-1228.

TRAJANO, E. Population ecology of *Pimelodella kronei*, troglobitic catfish from Southeastern Brazil (Siluriformes, Pimelodidae). **Environmental Biology of Fishes**, v.30, p.407-421, 1991.

TRAJANO, E. Políticas de conservação e critérios ambientais: princípios, conceitos e protocolos. **Estudos Avançados**, São Paulo, v.24, n.68, p.135-146, 2010.

TRAJANO, E.; BICHUETTE, M.E. **Biologia subterrânea: introdução**. São Paulo: Redespeleo, 2006. 92 p.

TRAVASSOS, L.E.P. **A importância cultural do carste e das cavernas**. 2010. 372 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2010.

TRAVASSOS, L.E.P.; TRAVASSOS, E.G.; TRAVASSOS, L.P.; RODRIGUES, E.R. Ensaio exploratório sobre a percepção do endocarste e do exocarste de alunos do ensino médio. **Espeleologia**, Ouro Preto, n.12, p.30-35. 2007.

TRAVASSOS, L.E.P.; GÓIS, A.J.; GUIMARÃES, R.L.; VARELA, I.D. A gruta de São Cosme e São Damião e a umbanda, Cordisburgo, Minas Gerais. **Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, Ourinhos, v.1, n.2, p.165-172, 2008.

USDL – UNITED STATES DEPARTMENT OF LABOR. OCCUPATIONAL SAFETY & HEALTH ADMINISTRATION. **Acetylene**. 2004. Disponível em: <http://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_216900.html>. Acesso em: 16.jul.2011.

UFMS – UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL. **Estudo de impacto ambiental da visitação turística do Monumento Natural Gruta do Lago Azul – Bonito, MS**. Campo Grande: UFMS, 2002. 153 p.

VAUGHAN, M.J.; MAIER, R.N.; PRYOR, B.M. Fungal communities on speleothem surfaces in Kartchner cavernas, Arizona, USA. **International Journal of Speleology**, v.40, n.1, p.65-77, 2011.

VERHEYDEN, S. Trace elements in speleothems: a short review of the state of art. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, v.3, n.1, p.1-5, 2005.

VERÍSSIMO, C.U.V.; SOUZA, A.E.B.A.; RICARDO, J.M.; BARCELOS, A.C.; NOGUEIRA NETO, J.A.; REIS, M.G. Microclima e espeleoturismo na gruta de Ubajara, CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 27, Januária. **Anais**. Januária: SBE, 2003. p.1-9.

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.244-253, 2005.

VIANA JÚNIOR, O. **Hidroquímica, hidrologia e geoquímica isotópica (O e H) da fácies de percolação vadosa autogênica, caverna Santana, Município de Iporanga, Estado de São Paulo**. 2002. 113 p. Dissertação (Mestrado em Geoquímica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.

VILLAR, E; FERNANDEZ, P.L.; QUINDOS, L.S.; SOLANA, J.R.; SOTO, J. Air temperatura and air interchanges at Altamira cave (Spain). **Cave Science**, v.11, n.2, p.92-98, 1984a.

VILLAR, E; BONET, A.; DIAZ-CANEJA,, B.; FERNANDEZ, P.L.; GUTIERREZ, I.; QUINDOS, L.S.; SOLANA, J.R.; SOTO, J. Ambient temperature variations in the hall of paintings of Altamira cave due to the presence of visitors. **Cave Science**, v.11, n.2, p.99-104, 1984b.

WATSON, A.J.; LOVELOCK, J.E. Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld. **Tellus**, v.35B, p.284-289, 1983.

WATSON, J.; HAMILTON-SMITH, E.; GILLIESON, D.; KIERNAN, K. (Eds.) **Guidelines for cave and karst protection**. Gland/Cambridge: IUCN, 1997. 63 p.

WHITE MARTINS. **Ficha de informação de segurança de produtos químicos**: cal de carbureto de cálcio. 2006. Disponível em: <<http://www.whitemartins.com.br/site/fispq/WM040333.pdf>>. Acesso em: 16.jul.2011.

WHITE MARTINS. **Acetileno**. s.d. Disponível em: <<http://www.whitemartins.com.br/site/catalogo/acetileno.html>>. Acesso em: 16.jul.2011.

WHITE, W.B. Evolution and age relations of karst landscapes. **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.36, n.1, p.45-52, 2007.

WHITE, W.B. Speleothem ontogeny: lessons from crystal growth theory and technology. In: WHITE, W. (Ed.) INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15, 2009, Kerrville. **Proceedings**. Kerrville: UIS/NSS, 2009, v.1, p.346-347.

WILBUR, E. **Air permit for the construction and operation of a calcium carbide manufacturing plant**. 2010. 91 p. Tese (Mestrado em Ciências) – Universidade de Missouri, Columbia. 2010.

WILKS, D.S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2.ed. Burlingon: Elsevier, 2006. 627 p.

WILLIAMS, G.C. Gaia, nature worship and biocentric fallacies. **The Quarterly Review of Biology**, v.67, n.4, p.479-486, 1992.

WILLIAMS, N.R.; WHITTINGTON, R.M. Death due to inhalation of industrial acetylene. **Journal of Toxicology: Clinical Toxicology**, v.39, n.1, p.69-71, 2001.

WILLIAMS, P.W. Karst evolution. In: GUNN, J. (Ed.) **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Taylor & Francis, 2004. p.1020-1026.

WILLIAMS, P.W. **World heritage caves and karst**. Gland: IUCN, 2008. 57p.

WORTHINGTON, S.R.H. A comprehensive strategy for understanding flow in carbonate aquifer. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, v.1, n.1, p.1-8, 2003.

WORTHINGTON, S.R.H. Hydraulic and geological factors influencing conduit flow depth. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, v.3, n.1, p.1-19, 2005.

WRAY, R.A.L. A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones. **Earth Science Reviews**, v.42, p.137-160, 1997.

WRAY, R.A.L. Quartzite dissolution: karst or pseudokarst? **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, v.1, n.2, p.1-9, 2003.

XLSTAT. **Manual do XLStat**. Paris: Addinsoft, 2009. s.p.

ZAVATTINI, J.A. **Estudos do clima no Brasil**. Campinas: Alínea, 2004. 398p.

ZELINKA, J. Microclimatic research in the Slovakian show caves. **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.31, n.1, p.151-163, 2002.



APÊNDICES

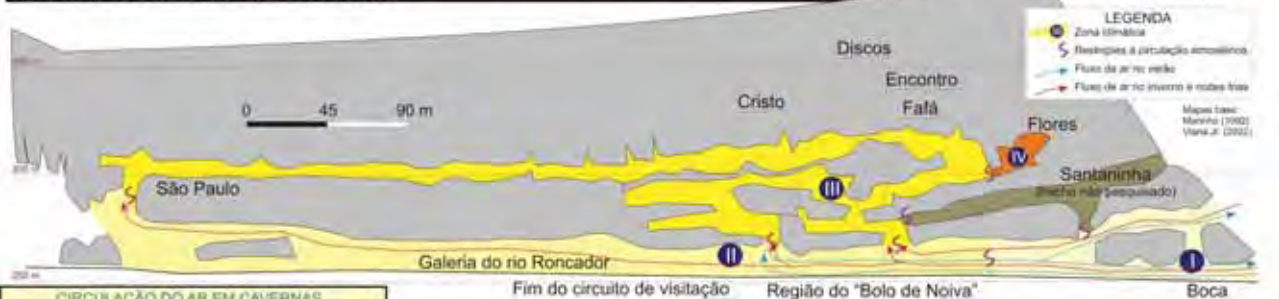
Conjunto de espeleotomas,
com destaque para as
estalagmites "colas",
na galeria do rio Morto.

APÊNDICES**APÊNDICE A**

TABELAS DE DADOS COLETADOS (MONITORAMENTO E PERFIL
ATMOSFÉRICO, EM MÍDIA ELETRÔNICA)

APÊNDICE B

CARACTERÍSTICAS GERAIS DA CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA E DOS IMPACTOS NO ESPELEOCLIMA E NOS ESPELEOTEMAS DA PORÇÃO FINAL DA CAVERNA DE SANTANA (PETAR, IPORANGA-SP), EM PERFIL LONGITUDINAL RETIFICADO



CIRCULAÇÃO DO AR EM CAVERNAS

A - ARMADILHA PARA A CAPTURA DO AR FRIO: cavernas que se abrem vertical para baixo em relação ao eixo horizontal, com um único acesso ao ambiente externo. Acumulam ar frio em seu interior, nas áreas mais profundas. Exemplo na região abissal, como o Lago Superior.

B - ARMADILHA PARA A CAPTURA DO AR QUENTE: cavernas que se abrem vertical para cima em relação ao eixo horizontal, com um único acesso ao ambiente externo. Acumulam ar mais quente em seu interior, nas galerias superiores. Exemplo na região: caverna de Santana (ver detalhes abaixo).

C - CAVERNAS COM NO MÍNIMO DUAS ENTRADAS EM ALTITUDES DIFERENTES: geram fluxo de circulação de ar em função das diferenças de temperatura do ar e pressão atmosférica. Sua circulação de ar é mais rápida, gerando a sensação de "vento". Exemplo na região: Caverna Água Suja no "Túnel do vento", e associada ao ar frio resfria em 1,1 m/s.

A CIRCULAÇÃO DO AR NA CAVERNA DE SANTANA
Na caverna de Santana a velocidade máxima do vento próximo à sua "boca" foi de 0,2 m/s. No inverno, ou mesmo em noites frias de verão, o ar frio entra na caverna, fica relativamente mais quente e se dirige para as galerias superiores (veja setas brancas). No verão a camada de ar é menor, e se restringe à galeria do rio Roncador (veja setas azuis), pois as galerias superiores formam uma "bolsa térmica" que restringe a circulação do ar.

Zonas climáticas internas:
I - Região próxima aos acessos externos, a temperatura e a umidade relativa do ar variam muito, simultaneamente à variação externa.
II - Região da galeria do rio após o "Bolo de Noiva", com a variação de temperatura e umidade relativa praticamente ao regime externo, mas em escala mais reduzida.
III - Região das galerias superiores, onde a variação da temperatura é bem menor, mas ainda presente. A umidade relativa do ar se mantém em 99,9%.
IV - Região do salão das Flores, com variações imperceptíveis de temperatura e ambiente saturado (99,9% de umidade relativa do ar).

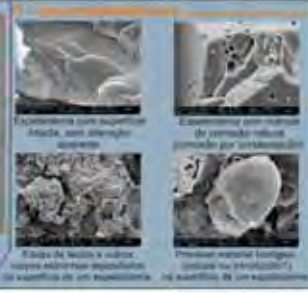
ENTRADA DE VISITANTES (TURISTAS, MONITORES ETC)

1 - AÇÃO PARA SE EVITAR ABAIXO TEMPERATURA DE ALGUMAS PARTES DE TEMPERATURAS BAIXAS EM DETERMINADOS PONTOS DA CAVERNA DE SANTANA, DE FORMA QUE NÃO AUMENTA A UMIDADE RELATIVA DO AMBIENTE, MAS AUMENTA A UMIDADE RELATIVA DO AMBIENTE.

2 - SE POUCA MASSA DE AR RELACIONADA À PRESSÃO DE UMIDADE RELATIVA ENCONTRA POUCA MASSA DE AR RELACIONADA À UMIDADE RELATIVA DO AMBIENTE.

3 - POUCA MASSA DE AR RELACIONADA À PRESSÃO DE UMIDADE RELATIVA ENCONTRA POUCA MASSA DE AR RELACIONADA À UMIDADE RELATIVA DO AMBIENTE.

4 - SE POUCA MASSA DE AR RELACIONADA À PRESSÃO DE UMIDADE RELATIVA ENCONTRA POUCA MASSA DE AR RELACIONADA À UMIDADE RELATIVA DO AMBIENTE.



VALORES HABITUAIS DA TEMPERATURA DO AR*

	Esterna		Boca		Bolo de Noiva		Galeria do Rio (Rio e Salão de Inverno)	
	Sep-Fev (+ chuvoso)	Mar-Ago (- chuvoso)	Sep-Fev (+ chuvoso)	Mar-Ago (- chuvoso)	Sep-Fev (+ chuvoso)	Mar-Ago (- chuvoso)	Sep-Fev (+ chuvoso)	Mar-Ago (- chuvoso)
Temp. (°C)	22,4	17,9	20,3	21,2	19,2	19,2	18,1	18,1
	Falá		Cristó		Encontro		Discos	
	Sep-Fev (+ chuvoso)	Mar-Ago (- chuvoso)	Sep-Fev (+ chuvoso)	Mar-Ago (- chuvoso)	Sep-Fev (+ chuvoso)	Mar-Ago (- chuvoso)	Sep-Fev (+ chuvoso)	Mar-Ago (- chuvoso)
Temp. (°C)	19,3	19,1	19,1	19,7	18,2	18,7	19,3	18,5

*Período base: abril de 2009 a março de 2010.

Fonte de dados informações e imagens: Heron A. S. Lobo. Estudo da dinâmica atmosférica subterrânea na determinação da capacidade de carga turística na caverna de Santana (PETAR - Iporanga, SP). Tese de Doutorado. Geociências e Meio Ambiente UNESP - Rio Claro, SP. Dezembro de 2011. 360 páginas (Apêndice B).

APÊNDICE C

TABELA DE TESTE DE VALORES EMPÍRICOS PARA DEMONSTRAÇÃO DA FUNCIONALIDADE E VALIDAÇÃO DA EQUAÇÃO 8.4, DO ÍNDICE DE LIMITE TEMPORAL DE PERMANÊNCIA

Tempo de permanência (min.)	Tempo de recuperação (min.)	Tempo limite (min.)	Índice obtido	Tempo disponível (min.)	Intervalo de entrada de grupos (min.)
10	800	960	0,083333333	410	34
10	500	960	0,052083333	410	21
10	250	960	0,026041667	410	11
10	100	960	0,010416667	410	4
20	800	960	0,041666667	410	17
20	500	960	0,026041667	410	11
20	250	960	0,013020833	410	5
20	100	960	0,005208333	410	2
30	800	960	0,027777778	410	11
30	500	960	0,017361111	410	7
30	250	960	0,008680556	410	4
30	100	960	0,003472222	410	1
10	1200	960	0,125	410	51,3
20	1000	960	0,052083333	410	21,4
30	960	960	0,033333333	410	13,7



ANEXO

Fisólitos,
as pérolas de cavernas.
Salão São Paulo,
caverna de Santana.

ANEXO

AUTORIZAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA E COLETA DE AMOSTRAS DE ROCHAS E ESPELEOTEMAS



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
 INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE
 DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE
 CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS
 SCEN Av. L4 S/N, Ed Sede do CECAV/IBAMA, CEP. 70818-000 – Brasília-DF
 Telefones: (61) 3316.1570/316.1572 FAX: (61) 3307-1370
 e-mail: cecav@icmbio.gov.br

Ofício Nº 087/2008/CECAV

Brasília, 06 de maio de 2008.

Ao Senhor
 José Batista Battello
 MD Diretor Geral do Instituto Florestal de São Paulo – IF
 Rua do Horto, 931
 Horto Florestal – SP
 02377-000

Assunto: **Encaminhamento de Nota Técnica nº 022/2008**

Senhor Diretor,

1. Conforme o Termo de Ajustamento de Conduta estabelecido entre a Fundação Florestal, IBAMA e CECAV/Instituto Chico Mendes, em caso de pedidos de realização de pesquisa envolvendo as cavidades naturais subterrâneas no PETAR, o CECAV deverá enviar parecer (ou nota técnica) à Fundação Florestal posicionando-se a respeito.
2. Em atendimento à solicitação do pesquisador Heros Augusto Santos Lobo cujo projeto de doutorado intitula-se "Microclimatologia e Geoespeleologia das Cavernas do PETAR, Iporanga – SP: Subsídios para o manejo turístico", estamos encaminhando, em anexo, a análise do referido projeto que encontra-se deferido através da Nota Técnica nº 022/2008.
3. Vale salientar que em nossas autorizações constam sempre uma série de observações que gostaríamos que fossem atendidas pelo pesquisador. Portanto, aproveitamos a oportunidade para transcrever abaixo as recomendações sugeridas para este caso:
 - As medições de microclima, assim como as coletas de material geológico e espeleológico, deverão ser feitas exclusivamente por pessoas envolvidas na referida pesquisa;
 - Deverá ser dada a preferência a coleta de espeleotemas já quebrados e, somente na ausência destes, sejam quebrados novos espeleotemas para coleta;
 - As coletas sejam feitas de forma a impactar o mínimo possível a aparência interna dos salões e/ou condutos onde serão realizadas.
4. Gostaríamos de solicitar que após realização da pesquisa, nos fosse enviada cópia do Relatório Final para que possamos incorporar em nosso banco de dados a respeito das cavernas do PETAR.

Atenciosamente,