

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO TEMPORAL DO BALANÇO DE
ENERGIA EM AMBIENTES URBANOS NA
CIDADE DE CUIABÁ-MT**

IVAN JULIO APOLONIO CALLEJAS

ORIENTADORA

PROF.^a Dr.^a MARTA CRISTINA DE JESUS ALBUQUERQUE NOGUEIRA

CO-ORIENTADOR PROF. Dr. MARCELO SACARDI BIUDES

Cuiabá, MT
Março/ 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO TEMPORAL DO BALANÇO DE
ENERGIA EM AMBIENTES URBANOS NA
CIDADE DE CUIABÁ-MT**

IVAN JULIO APOLONIO CALLEJAS

*Tese apresentada junto ao Programa de
Pós-Graduação em Física Ambiental da
Universidade Federal de Mato Grosso,
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Doutor em Física Ambiental.*

ORIENTADORA

PROF.^a Dr.^a MARTA CRISTINA DE JESUS ALBUQUERQUE NOGUEIRA

CO-ORIENTADOR PROF. Dr. MARCELO SACARDI BIUDES

Cuiabá, MT
Março/ 2012

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte

C158a Callejas, Ivan Julio Apolonio.
Avaliação temporal do balanço de energia em ambientes urbanos na cidade de Cuiabá-MT / Ivan Julio Apolonio Callejas. -- 2012.
xviii, 242 f. ; 30 cm : color. (incluem figuras e tabelas)

Orientadora: Marta Cristina de Jesus Alguquerque Nogueira.
Co-orientador: Marcelo Sacardi Biudes.
Tese (doutorado) -- Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2012.

Bibliografia: f. 221-234

1. Fluxos de energia. 2. Razão de Bowen. 3. Dossel urbano. I. Título.

CDU 536.722(817.2)

Catalogação na fonte: Maurício S.de Oliveira CRB/1-1860.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Julio e Ivone e às mulheres da minha vida: Luciana, Carolina e Isabela.

AGRADECIMENTOS

- A Prof^ª. Dr.^a Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira por ter aceitado ser a minha orientadora nesta pesquisa;
- Ao Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho;
- Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira (Paraná) pela disponibilização do equipamento saldo radiômetro, sem o qual esta pesquisa não teria sido realizada;
- Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) por terem aceitado compartilhar o conhecimento que possuem;
- À Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), instituição em que me formei e que me orgulho de fazer parte do seu corpo docente;
- Aos docentes do Departamento de Arquitetura e Urbanismo por terem me apoiado e concedido afastamento para capacitação;
- Ao Prof. Dr. Luis Miguel de Miranda pela disponibilização dos dados do Tráfego Médio Diário da Avenida Miguel Sutil e Historiador Rubens de Mendonça;
- À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) pelo financiamento concedido a esta pesquisa (Processo n° 445139/2009).
- Aos diretores das escolas estaduais João Briene Camargo, Ulisses Cuiabano e André Avelino Ribeiro por terem me permitido instalar os equipamentos meteorológicos nas dependências das escolas;
- A Prof.^a. Luciane Cleonice Durante pela ajuda no desenvolvimento desta tese; e,
- A todos aqueles que de certa forma contribuíram para a realização deste trabalho, em especial ao amigo Geison Jader Mello, pela sua ajuda durante a instrumentação dos sítios.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVEATURAS.....	viii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 PROBLEMÁTICA.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 CLIMA URBANO.....	5
2.1.1 Natureza do Clima Urbano.....	6
2.1.2 Formação e Características do Clima Urbano.....	6
2.1.3 Escalas Espaciais e Temporais do Clima Urbano.....	8
2.2 A CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA (CLA) E SUAS SUBDIVISÕES ...	11
2.3 A CAMADA LIMITE URBANA (CLU)	13
2.4 BALANÇO DE ENERGIA EM SUPERFÍCIES URBANAS.....	16
2.4.1 Fluxo de Calor Antropogênico (Q_F).....	28
2.4.2 Fluxo de Calor Armazenado Dentro Dossel Urbano (ΔQ_S).....	33
2.4.3 Fluxo de Calor Sensível e Latente (Q_H e Q_E).....	41
3. ÁREA DE ESTUDO.....	50
3.1 A CIDADE DE CUIABÁ - MT.....	50
3.2 CLIMA	53
3.3 EVOLUÇÃO URBANA DE CUIABÁ	57

4. MATERIAIS E MÉTODOS	60
4.1 MATERIAIS	60
4.1.1 Instrumentação dos Sítios Urbanos 1, 2 e 3	60
4.2 MÉTODO.....	62
4.2.1 Sítios Intra-Urbanos	62
4.2.2 Avaliação Morfologia do entorno dos sítios	77
4.2.3 Avaliação do Calor Antropogênico (Q_F).....	83
4.2.4 Calor Antropogênico liberado pelo Metabolismo Humano (Q_{FM}).....	89
4.2.5 Avaliação do Calor Armazenado no Dossel Urbano (Q_F)	92
4.2.6 Calibração dos Instrumentos	94
4.2.7 Estimativa do Fluxo de Calor Latente (Q_H) e Calor Sensível pelo Método da Razão de Bowen	95
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	97
5.1 MORFOLOGIA DO ENTORNO DOS SÍTIOS URBANOS.....	97
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS	105
5.2.1 Precipitação Pluviométrica.....	105
5.2.2 Radiação Solar Incidente	106
5.2.3 Temperatura e Umidade do Ar.....	112
5.2.4 Velocidade do Ar	124
5.3 CALOR ANTROPOGÊNICO (Q_F)	132
5.3.1 Variação Sazonal e Diária do Calor liberado pelas Fontes Veiculares (Q_{FV})	132
5.3.2 Variação Sazonal e Diária do Calor liberado pelas Fontes Estacionarias Q_{FS} (Eletricidade - Q_{FSE} e Consumo de Combustíveis – Q_{SFS}).....	134
5.3.3 Variação Sazonal e Diária do Calor liberado pelo Metabolismo Humano (Q_{FM})	138

5.3.4	Variação Sazonal e Diária do Calor Antropogênico (Q_F).....	140
5.3.5	Comparação Interurbanas entre os Sítios.....	146
5.4	CALOR ARMAZENADO NO DOSSEL URBANO (ΔQ_s)	148
5.4.1	Coefficientes do Modelo de Histerese (OHM) determinados para região	148
5.4.2	Variação Sazonal e Diária do Calor Armazenado no Dossel Urbano nos Sítio 1, 2 e 3	152
5.4.3	Comparação Interurbanas entre os Sítios.....	160
5.5	RADIAÇÃO LÍQUIDA DISPONÍVEL NO MEIO (Q^*)	162
5.5.1	Variação Sazonal e Diária da Radiação Líquida nos Sítios 1, 2 e 3	162
5.5.2	Comparação Interurbanas entre os Sítios.....	168
5.6	FLUXOS DE CALOR LATENTE (Q_E) E SENSÍVEL (Q_H)	173
5.6.1	Variação Sazonal e Diária-Fluxo de Calor Latente e Sensível-Sítios 1, 2 e 3	173
5.6.2	Comparação Interurbanas entre os Sítios.....	184
5.7	RAZÃO DE BOWEN	187
5.7.1	Variação Sazonal e Diária da Razão de Bowen nos Sítios 1, 2 e 3.....	187
5.7.2	Comparação Interurbanas entre os Sítios.....	195
5.8	BALANÇO DE ENERGIA NOS SÍTIOS URBANOS 1, 2 E 3	197
5.8.1	Comentários Finais	209
6.	CONCLUSÕES	217
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	220
7.	BIBLIOGRAFIAS	221
7.1	BIBLIOGRAFIAS CITADAS	221
7.2	BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS.....	233
	ANEXOS	235

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Dimensões espacial e temporal típicas dos fenômenos atmosféricos segundo Orlansky apud Andrade (2005)..... 9
- Figura 2** – Camadas da CLA em resposta ao aquecimento e resfriamento da superfície. As variáveis T , θ , q e V_{CM} e V_g e z_i são respectivamente, temperatura do ar, temperatura potencial, umidade específica do ar, velocidade do vento na camada de mistura, vento geostrófico e altura da camada limite 13
- Figura 3** – Representação esquemática da camada limite urbana, incluindo escalas e camadas verticais 15
- Figura 4** – Ilustração esquemática dos componentes do balanço de energia no volume de controle (*superfície + edifícios + ar*) definido por Oke (1987). O balanço de energia superficial por unidade de área sobre o topo do volume de controle é dado por $Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$, sendo que $\Delta Q_A = Q_{sai} - Q_{ent}$ é a advecção horizontal que pode acontecer dentro do dossel urbano. RSL (Roughness sub-layer) é a subcamada rugosa e a UCL (Urban canopy layer) é a camada do dossel urbano... 17
- Figura 5** – Coeficientes da regressão proposta por Camuffo-Bernardi para descrição de ΔQ_S (ou Q_G para superfícies planas) em função de Q^* . a_1 é a inclinação da curva, a_2 a largura da histerese e a_3 é a interceptação da curva no eixo y (ΔQ_S)..... 37
- Figura 6** – a) Representação conceitual das áreas de contribuição (“footprints”) para os sensores de radiação (círculo pontilhado), concentrações escalares (temperatura e umidade) e fluxos turbulentos (elipse tracejada). b) Representação esquemática da área de contribuição para um sensor posicionado a uma altura z_m . Fonte: a) Oke (2006) e b) Schmid (1994) 40
- Figura 7** – Representação dos fluxos de energia na interface entre o ar e a superfície mostrando a convenção de sinais adotada na estimativa dos fluxos. ΔQ_A representa fluxo advectivo horizontal (normalmente desprezado), Q^* a radiação líquida, Q_H fluxo de calor sensível, Q_E fluxo de calor latente, ΔQ_S fluxo de calor armazenado no dossel urbano, ΔT e Δe são a diferença da temperatura e pressão de vapor d’água entre os dois níveis de medição, $\partial T/\partial z$ e $\partial e/\partial z$ são os valores correspondentes aos gradientes de temperatura e pressão de vapor d’água 44
- Figura 8** – Localização da cidade de Cuiabá no estado de Mato Grosso e no Brasil 50

Figura 9 – Mapa do Município de Cuiabá - MT	51
Figura 10 – Corte esquemático do Mapa Físico do Mato Grosso.....	52
Figura 11 – Temperatura e Umidade, médias mensais para Cuiabá.....	54
Figura 12 – Pressão (marcador azul) e módulo da velocidade do vento (marcador círculo) média mensal para Cuiabá	55
Figura 13 – Frequência relativa média do vento durante os meses do ano.....	56
Figura 14 – Precipitações médias mensais em Cuiabá	56
Figura 15 – Evolução do perímetro urbano da Cidade de Cuiabá	59
Figura 16 – Organização Geopolítica de Cuiabá	59
Figura 17 – Estações meteorológicas instaladas nos Sítios 1 (a), Sítio 2 (b) e Sítio 3 (c), (d) esquema de montagem das estações e (e) detalhe de instalação do fluxímetro no concreto	61
Figura 18 – Sítios intraurbanos 1, 2 e 3 adotados para estudo microclimático de Cuiabá-MT	62
Figura 19 – Abairramento de Cuiabá e localização dos Sítios intraurbanos 1, 2 e 3	63
Figura 20 – Entorno da Escola Estadual João Briene Camargo – raio de 500m	65
Figura 21 – Imagem de satélite da Escola Estadual João Briene Camargo	65
Figura 22 – Fotos da escola: a) Região frontal da escola, b) Estacionamento, c) Espaço para recreação, d) Pátio Central, e) Pátios de Circulação.....	67
Figura 23 – Entorno da Escola Estadual Ulisses Cuiabano – raio de 500m	69
Figura 24 – Imagem de satélite da Escola. Estadual Prof. Ulisses Cuiabano.	70
Figura 25 – Fotos da escola: a) Região de acesso à escola, b) estacionamento e pátio cívico, c) pátio central, d) pátios de circulação e) campo e quadra poliesportiva.....	72
Figura 26 – Entorno da Escola Estadual André Avelino Ribeiro – raio de 500m	73
Figura 27 – Imagem de satélite da Escola Estadual André Avelino Ribeiro.....	74
Figura 28 – Fotos da escola: a) Região frontal da escola, b) Estacionamento e Pátio Cívico, c) Área de recuo frontal da escola, d) Pátio Central, e) Pátio de Circulação	77
Figura 29 – Definição das dimensões superficiais utilizadas na análise morfométrica dos parâmetros z_0 e z_d proposto por Macdonald et al. (1998).....	80
Figura 30 – Variação diária dos valores horários da fração de tráfego de veículos em movimento nas avenidas próximas aos Sítios 1, 2 e 3	86
Figura 31 – Variação diária da densidade populacional para os sítios pesquisados.	87

Figura 32 – Variação diária da fração horária de consumo de eletricidade para os meses de agosto (menor consumo) e outubro (maior consumo) na cidade de Cuiabá	88
Figura 33 – Variação diária da taxa metabólica (a) e da densidade populacional (b) no entorno das áreas estudadas	90
Figura 34 – Detalhe da calibração dos sensores (a) termo-higrômetros e (b) saldos radiômetros.....	94
Figura 35 – Uso e ocupação do solo no entorno dos Sítios 1(a), 2 (b) e 3(c).....	98
Figura 36 – Precipitação mensal entre os meses de setembro de 2010 a agosto de 2011 e médias mensais de precipitação avaliadas por Campelo Junior et al. (1991) e pelo INMET entre 1961 à 1990.	105
Figura 37 – Ciclo diário médio mensal (\pm DP) da R_g ($W m^{-2}$) de setembro de 2010 a agosto de 2011 nos Sítios 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....	107
Figura 38 – Média diária mensal (\pm DP) da radiação solar incidente diária nos Sítios 1, 2 e 3.....	110
Figura 39 – Diferenças interurbanas entre as médias da radiação solar mensais ...	111
Figura 40 – Ciclo diário médio mensal (\pm DP) da temperatura do ar de setembro de 2010 a agosto de 2011 nos Sítios 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....	113
Figura 41 – Ciclo diário médio mensal (\pm DP) da umidade do ar de setembro de 2010 a agosto de 2011 nos Sítios 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....	115
Figura 42 – (a) Temperatura média mensal do ar \pm DP e (b) umidade relativa média mensal do ar \pm DP (b) para os Sítios 1, 2 e 3, Estação Aeroporto, Campelo Junior et al. (1991) e Normais Climatológicas (1961-1990)	120
Figura 43 – (a) Diferenças interurbanas entre as médias mensais da temperatura do ar e (b) diferenças interurbanas entre umidade relativa do ar	123
Figura 44 – Ciclo diário médio mensal da velocidade do ar (\pm DP) de setembro de 2010 a agosto de 2011 nos Sítios 1, 2 e 3	125
Figura 45 – Frequência relativa média do vento durante os meses do ano para os Sítios 1, 2 e 3.....	128
Figura 46 – Velocidade do ar média mensal (\pm DP) para os Sítios 1, 2 e 3, Estação Aeroporto, Campelo et al. (1991) e Normais Climatológicas (1961-1990).....	130

Figura 47 - Diferenças interurbanas entre as médias mensais da velocidade do ar nos Sítios urbanos	131
Figura 48 – Variação do calor antropogênico liberado pelas fontes veiculares nos meses de maior e menor consumo de combustíveis.....	134
Figura 49 – Variação do calor antropogênico liberado pelas fontes estacionárias de eletricidade nos meses de maior e menor consumo de eletricidade.....	137
Figura 50 – Variação diária do calor antropogênico liberado pelo metabolismo humano nos Sítios 1, 2 e 3	139
Figura 51 – Variação sazonal dos fluxos de calor antropogênicos (Q_F) em termos de intensidade (a) e porcentagens (b) nos Sítios 1, 2 e 3 em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$	142
Figura 52 – Desvio relativo da média anual dos valores de Q_F mensais - Sítios 1,2 e 3.....	143
Figura 53 – Variação diária do fluxo de calor antropogênico (Q_F) liberado no entorno dos Sítios 1, 2 e 3	144
Figura 54 – Diferenças interurbanas entre as médias mensais do calor antropogênico nos sítios urbanos	147
Figura 55 – Simulação das curvas de histerese com os coeficientes médios anuais determinados para (a) asfalto, cânion, solo, concreto, telhado e vegetação e (b) Sítios 1, 2 e 3.....	150
Figura 56 – (a) Variação sazonal do fluxo de calor armazenado no dossel urbano e (b) razão entre ΔQ_S e $Q^* + Q_F$ para os Sítios 1, 2 e 3	152
Figura 57 – Variação média diária da radiação líquida (Q^*) / fluxo de calor armazenado no dossel urbano (ΔQ_S) e diagrama de dispersão entre ΔQ_S e o Q^* para os Sítios 1, 2 e 3 no período seco	156
Figura 58 – Variação média diária da radiação líquida (Q^*) / fluxo de calor armazenado no dossel urbano (ΔQ_S) e diagrama de dispersão entre ΔQ_S e o Q^* para os Sítios 1, 2 e 3 no período úmido.....	157
Figura 59 – Taxa média de ΔQ_S em função da fração de área plana impermeabilizada e vegetada no período seco (linha tracejada) e úmido (linha pontilhada).....	160
Figura 60 – Variação sazonal da diferença de energia armazenada dentro do dossel urbano nos Sítios 1, 2 e 3	161

Figura 61 – (a) Variação sazonal da radiação líquida e (b) razão entre Q^* e R_g nos Sítios 1, 2 e 3.....	163
Figura 62 - Variação média diária da radiação direta incidente (R_g) / radiação líquida (Q^*) e diagrama de dispersão entre R_g e Q^* para os Sítios 1, 2 e 3 no período seco.	166
Figura 63 - Variação média diária da radiação direta incidente (R_g) / radiação líquida (Q^*) e diagrama de dispersão entre R_g e Q^* para os Sítios 1, 2 e 3 no período úmido.	167
Figura 64 – Variação sazonal da diferença de energia armazenada dentro do dossel urbano nos Sítios 1, 2 e 3	172
Figura 65 – (a) Variação sazonal dos valores mensais dos fluxos de calor latente e (b) razão entre o fluxo de calor latente energia disponível no meio nos Sítios 1, 2 e 3	174
Figura 66 – (a)Variação sazonal dos valores mensais dos fluxos de calor sensível e (b) razão entre o fluxo de calor sensível energia disponível no meio nos Sítios 1,2 e 3	175
Figura 67 – Variação média diária do fluxo de calor latente (Q_E) e fluxo de calor sensível e diagrama de dispersão entre Q_E / Q_H e radiação líquida (Q^*) nos Sítios 1, 2 e 3 – período seca.....	179
Figura 68 – Variação média diária do fluxo de calor latente (Q_E) e fluxo de calor sensível e diagrama de dispersão entre Q_E / Q_H e radiação líquida (Q^*) no Sítio 1, 2 e 3 – período úmido	180
Figura 69 – Relações entre (a) Q_E/Q^* e (b) $Q_H/(Q^*-\Delta Q_s)$ com a fração de área plana vegetada (F_V) e (c) Q_H/ Q_E com a fração de área plana impermeabilizada (F_I) entre os Sítios 1, 2 e 3 e de clima temperado. Dados representativos das 10 às 14h	183
Figura 70 – Variação sazonal da diferença entre os fluxos turbulentos de (a) calor latente e (b) calor sensível no entorno dos Sítios 1, 2 e 3	185
Figura 71 – Variação sazonal dos valores médios mensais da razão de Bowen nos Sítios 1,2 e 3.....	188
Figura 72 – Variação sazonal dos valores diários médio mensais da razão de Bowen no período seco nos Sítios 1 (a), 2 (b) e 3 (c).	191

Figura 73 – Variação sazonal dos valores diários médio mensais da razão de Bowen no período úmido nos Sítios 1 (a), 2 (b) e 3 (c).	192
Figura 74 – Desenho esquemático do comportamento da temperatura e umidade, bem como o sentido dos fluxos dentro dos canions urbanos dos Sítios 1 e 2. As setas indicam o sentido da menor para maior temperatura e pressão de vapor d'água entre os níveis de medições.....	195
Figura 75 – Variação sazonal da diferença entre β entre os Sítios 1, 2 e 3.....	196
Figura 76 – Curso diário dos valores médios mensais dos componentes do balanço de energia para os Sítios 1 (a) , 2 (b) e 3 (c) no período seco.....	201
Figura 77 – Curso diário dos valores médios mensais dos componentes do balanço de energia para os Sítios 1 (a) , 2 (b) e 3 (c) no período úmido.....	202
Figura 78 – Variação média diária de (a) $\Delta Q_s/(Q^*+Q_F)$, (b) $Q_E/(Q^*+Q_F)$ e (c) $Q_H/(Q^*+Q_F)$ nos Sítios 1, 2 e 3 - estação seca.....	205
Figura 79 – Variação média diária de (a) Q_H/Q_E , (b) $Q_H/\Delta Q_s$ e (c) $(\Delta Q_s+Q_H)/Q_E$ nos Sítios 1, 2 e 3 - estação seca.....	206
Figura 80 – Variação média diária de (a) $\Delta Q_s/(Q^*+Q_F)$, (b) $Q_E/(Q^*+Q_F)$ e (c) $Q_H/(Q^*+Q_F)$ nos Sítios 1, 2 e 3 - estação úmida	207
Figura 81 – Variação média diária (a) Q_H/Q_E , (b) $Q_H/\Delta Q_s$ e (c) $(\Delta Q_s+Q_H)/Q_E$ nos Sítios 1, 2 e 3 - estação úmida.....	208

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação média diária dos valores máximos dos fluxos de energia nas cidades de clima temperado e subtropical.....	27
Tabela 2 – Condições a que método BREB deve obedecer na ausência de fluxo advectivo horizontal para que os dados sejam confiáveis e consistentes.....	48
Tabela 3 – Dados demográficos do município de Cuiabá-MT.	52
Tabela 4 – Evolução do Perímetro Urbano de Cuiabá.....	58
Tabela 5 – Classificação preliminar da rugosidade do terreno proposta por Davenport et al. (2000). z_0 representa o comprimento de rugosidade, z_d o deslocamento do plano zero e z_H a altura média do edifícios no local em análise	80
Tabela 6 – Classificação simplificada das Zonas Climáticas Urbanas (ZCU) de acordo com Oke (2006).....	82
Tabela 7 – Dados para avaliação da distância média percorrida pelos veículos. FE é o fator de economia, DMD a distância média diária, FC o fator de capacidade e $DMDP$ a distância média diária ponderada.....	85
Tabela 8 – Energia liberada pelos veículos em função da distância percorrida. α_{comb} é a fração horária de cada tipo de veículo, NHC_{comb} o calor líquido liberado pelo consumo de cada tipo de combustível, ρ densidade de cada tipo de combustível, FE o fator de economia para cada tipo de veículo e EV_{comb} a energia liberada pelos veículos em função da distancia.....	85
Tabela 9 – Coeficientes médios adotados para o Modelo OHM proposto por Grimmond et al. (1991) para estimar o fluxo de calor armazenado no dossel urbano nos sítios localizados na cidade de Cuiabá – MT	94
Tabela 10 – Fração de área para cada categoria adotada no entorno do Sítio 1, 2 e 3.....	397
Tabela 11 – Caracterização e descrição geral do entorno e dos sítios urbanos.....	102
Tabela 12 – Diferenças médias mensais interurbanas entre a temperatura e umidade relativa do ar entre os Sítios 1, 2 e 3	122
Tabela 13 – Fração de área plana vegetada, impermeabilizada e relações entre Q_E/Q^* , Q_H/Q_E e $Q_H/(Q^* - \Delta Q_S)$ para os Sítios 1, 2 e 3 ($Q^* > 0$).....	182
Tabela 14 – Fração de área e coeficientes ponderados a_1 , a_2 e a_3 para o entorno do Sítio 2 ao longo dos meses do ano.	241

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVEATURAS

L	Componente local do clima
M	Elemento do clima
R	Componente regional do clima
U	Componente urbana do clima
ICU	Ilha de Calor Urbana
α	Albedo
β	Escala do microclima ou razão de Bowen ($\beta=Q_H/Q_E$)
γ	Escala do microclima
CLA	Camada Limite Atmosférica ou Planetária
CLP	Camada Limite Planetária
AL	Atmosfera Livre
CLU	Camada Limite Urbana
CLS	Camada Limite Superficial
CM	Camada de Mistura Convectiva
CE	Camada Transição ou Zona de Entranhamento
CMR	Camada de Mistura Residual
SI	Subcamada Inercial
SR	Subcamada Rugosa
CDU	Camada do Dossel Urbano
H/W	Cânion Urbano – relação dada entre a altura e espaçamento entre edifícios
z_i	Altura da camada limite
Q^*	Saldo de radiação líquida
Q_F	Fonte de calor antropogênica
Q_H	Fluxo de calor sensível turbulento
Q_E	Fluxo de calor latente turbulento
ΔQ_S	Fluxo de calor armazenado dentro do dossel urbano
ΔQ_A	Advecção horizontal de calor sensível e latente
K_\downarrow	Radiação de ondas curtas incidente
K_\uparrow	Radiação de ondas curtas refletido
L_\downarrow	Radiação de ondas longas emitido pelo céu
L_\uparrow	Radiação de ondas longas emitido pela superfície
MDUS	Modelos numéricos de dossel urbano
Q_F	Fluxo de calor antropogênico

Q_{FV}	Fluxo de calor antropogênico gerado pelas fontes veiculares
Q_{FS}	Fluxo de calor gerado pelas fontes estacionárias
Q_{FM}	Fluxo de calor gerado pelo metabolismo humano e/ ou animal
$pcDVD$	Média percorrida pelos veículos por pessoa dia em km pessoa ⁻¹ dia ⁻¹
$F_t(h)$	Fração de tráfego em uma hora (fração tráfego/h)
$\rho_{pop}(h)$	Densidade de população em uma hora (hab/h)
EV	Energia liberada pela queima de combustíveis pelos veículos pela distância percorrida (J/m)
a_{comb}	Fração de veículos circulando em cada hora
EV_{comb}	Energia liberada pelos veículos em função da distância percorrida e pelo tipo de combustível utilizado
NHC_{comb}	Calor líquido liberado pela queima do combustível em J/litro
ρ_{comb}	Densidade do combustível utilizado
FE	Fator de economia de combustível (km/l ou m/l)
$NWRT$	Número de pessoas residentes na cidade
WP	Número de pessoas que não residem na cidade núcleo
Q_{FSE}	Fluxo de calor antropogênico liberado pelo consumo de eletricidade
Q_{FSF}	Fluxo de calor liberado pelas fontes estacionárias
E_{DPC}	Fluxo de energia liberado devido ao consumo diário de eletricidade pelas fontes estacionárias
$f(h)$	Fração horária do consumo diário de eletricidade pelas fontes estacionárias
NHC_{electr}	Energia liberada devido consumo de eletricidade
C_{electr}	Consumo mensal de eletricidade pelas fontes estacionarias
n_d	Número de dias do mês
A	Área urbanizada
M	Taxa metabólica desempenhada pela pessoa
RES	Método do Resíduo do balanço de energia
TMS	Esquema de Massa Térmica
A_i	Área da superfície de cada componente i do sistema
C_i	Capacidade térmica de cada componente dos materiais i
$\Delta T/\Delta t$	Taxa de mudança de temperatura que acontece em cada componente i dentro volume de controle por intervalo de tempo
dV_i	Volume de cada componente i
α_i	Fração de área urbana coberta por cada tipo de superfície i
a_i	Relação direta entre a energia disponível no meio e o calor armazenado para

	cada tipo de material i
b_i	Deslocamento da origem para cada tipo de material i
t	Tempo
a_1	Dependência existente entre o calor armazenado no dossel e o saldo de radiação na superfície (adimensional)
a_2	Amplitude da histerese (em horas)
a_3	Interceptação da relação no eixo y em $W m^{-2}$
$\partial Q^*/\partial t$	Taxa de variação da radiação líquida no tempo
Q^*_{t+1}	Saldo de radiação no instante $t+1$
Q^*_{t-1}	Saldo de radiação no instante $t-1$
a_{Ki}	Coefficientes empíricos para cada tipo de superfície i para o modelo de histerese
f_i	Frações das áreas das superfícies i dentro da área pesquisada para o modelo de histerese
e	Comprimento longitudinal da área elíptica de contribuição (footprint)
d	Comprimento lateral (d) da área elíptica de contribuição (footprint)
z_m	Altura de referência de instalação dos sensores em campo
z_0	Deslocamento do plano zero
z_d	Deslocamento do plano zero
L	Comprimento de estabilidade de Monin-Obukhov
u^*	Velocidade de atrito
σ_v	Desvio da direção do vento
u_m	Velocidade média do vento
A_{pl}	Contribuição do sinal registrado pelos sensores
f_p	Função peso da fonte
ρ	Densidade do ar
c_p	Calor específico da água a pressão constante
λ	Calor latente de evaporação
$\partial u/\partial z$	Gradientes verticais de velocidade média do vento
$\partial T/\partial z$	Gradientes verticais da temperatura
$\partial q/\partial z$	Gradientes verticais da umidade específica
K_M	Coefficiente de transporte turbulento
K_H	Coefficiente de difusividade térmica
K_E	Coefficiente de transferência turbulenta para o vapor d'água

τ	Fluxo de momento expresso em $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$
u'	Flutuações turbulentas da componente horizontal do vetor velocidade do ar
w'	Flutuações turbulentas da componente vertical do vetor velocidade do ar
T'	Flutuação da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$ ou K)
q'	Flutuação da umidade específica do ar (kg kg^{-1})
$\langle \rangle$	Média no tempo que seja representativa da esperança estatística da população
ΔT	Diferença de temperatura entre dois níveis verticais de medição
Δe	Diferença pressão de vapor d'água entre dois níveis verticais de medição
p	Pressão atmosférica
ϵ	Razão entre os pesos moleculares do vapor d'água e do ar (0,622)
L_v	Calor latente de vaporização da água
ϵ	Erro associado às medições
δ	Resolução dos sensores
A_{W}	Classificação Köppen-Geiger para um dos tipos de clima de savana
BSh	Classificação Köppen-Geiger para um dos tipos de clima de savana
A_S	Área total de superfícies ativas
A_{Plana}	Área plana total
A_V	Área plana vegetada
A_I	Área plana impermeável
A_P	Área plana permeável
A_T	Área dos telhados dos edifícios
A_C	Áreas das paredes
\bar{L}_x	Largura do edifício
\bar{L}_y	Comprimento do edifício
\bar{z}_H	Altura do edifício
\bar{W}_x	Espaçamento transversal do edifício
\bar{W}_y	Espaçamento longitudinal do edifício
\bar{D}_x	Soma de \bar{L}_x e \bar{W}_x
\bar{D}_y	Soma de \bar{L}_y e \bar{W}_y
\bar{A}_T	Área total do arranjo espacial
\bar{A}_P	Área plana do edifício
\bar{A}_F	Área frontal do edifício na direção perpendicular ao fluxo de vento
z_H	Altura média dos obstáculos rugosos existentes dentro do arranjo espacial urbano

z_r	Altura da subcamada rugosa ou camada de mistura
ISA	Índice de Sombreamento Arbóreo
IDA	Índice de Densidade Arbóreo
UR_a	Umidade relativa do ar
e	Pressão de vapor do ar atual
e_s	Pressão de vapor d'água do ar saturado
T_a	Temperatura do ar
T_a (<i>médio</i>)	Temperatura média do ar entre os níveis de medição

RESUMO

CALLEJAS, I. J. A. *Avaliação temporal do balanço de energia em ambientes urbanos na cidade de Cuiabá-MT*. Cuiabá, 2012. 265f. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso.

Os impactos ocasionados pela ação antrópica sobre o meio ambiente na cidade de Cuiabá-MT foram responsáveis por mudanças no clima, ocasionando entre outras consequências modificações no balanço de energia das superfícies urbanizadas. Diante deste cenário, esta pesquisa objetivou avaliar temporalmente o balanço de energia em três ambientes urbanos localizados em posições distintas da cidade de Cuiabá visto que esta abordagem ainda é de pouca utilização no meio urbano no Brasil. Para tanto, selecionou-se três ambientes urbanos: Sítio 1 localizado em região mais central (região leste), o Sítio 2 em região intermediária (região oeste), e Sítio 3 em região periférica (região norte). O fluxo de calor antropogênico dissipado dentro do dossel urbano (Q_F) representou anualmente cerca de 5% da energia disponível no meio ($Q^* + Q_F$) nos Sítios 1, 2 e 3. As parcelas dos fluxos de calor armazenado dentro do dossel urbano (ΔQ_s), de calor latente (Q_E) e de calor sensível (Q_H) corresponderam na estação seca a 26, 28 e 46% energia disponível no Sítio 1 e a 23, 30 e 46% na estação úmida, respectivamente. No Sítio 2, estas frações corresponderam na seca a 24, 31 e 45% e a 20, 46 e 33% na úmida, enquanto no Sítio 3, a 28, 30 e 42% e 26, 32 e 45%, respectivamente. Os valores médios diurnos ($Q^* > 0$) da razão de Bowen (β) na seca foram 1,80, 1,51 e 1,66 nos Sítios 1, 2 e 3, respectivamente, e 1,62, 0,75 e 1,68, na úmida, o que implica afirmar que os fluxos turbulentos de calor sensível preponderaram sobre os fluxos de calor latente nas superfícies urbanizadas pesquisadas. Exceção aconteceu no Sítio 2 durante a estação chuvosa em virtude da maior presença de vegetação em seu entorno. Constatou-se nos três sítios que ΔQ_s e Q^* se encontravam em fase e estes descreveram trajetória elíptica no sentido anti-horário. Verificou-se que as taxas de fluxos de calor armazenado no dossel urbano e as dos fluxos de calor sensível estão diretamente relacionadas à fração de área plana impermeabilizada e inversamente à fração de área vegetada existente no entorno dos sítios urbanos pesquisados. As frações médias anuais estabelecidas para Q_E/Q^* localizaram-se acima da curva teórica estabelecida para as cidades de clima temperado, enquanto Q_H/Q_E e $Q_H/(Q^* - \Delta Q_s)$, abaixo, demonstrando a necessidade de aprofundamento de pesquisas sobre o tema em cidades de clima tropicais. Os resultados encontrados constituem importantes subsídios para o planejamento e gestão das cidades, pois podem auxiliar no estabelecimento de critérios e recomendações que possam ser inseridos no plano diretor da cidade de Cuiabá-MT com vistas a melhorar a qualidade de vida de sua população.

Palavras-chave: Fluxos de energia, razão de Bowen, dossel urbano.

ABSTRACT

CALLEJAS, I. J. A. *Temporal evaluation of the energy balance in urban environments in the Cuiabá city*. Cuiabá, 2012. 265f. Thesis (Doctorate in Environmental Physics); Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

The impacts caused by anthropogenic action on the environment of Cuiabá's city were responsible for changes in the city's climate, resulting modification in energy balance of the city. Against this background, this study aimed to evaluate the temporal energy balance in urban environments located in three different positions of the Cuiabá city since this approach has not been widely used in the urban areas in Brazil. For this purpose, it was selected three sites in the city: Site 1 located in central region (Eastern), Site 2 in the intermediate region (West), and Site 3 in the peripheral region (Northern). The anthropogenic heat flux dissipated inside the urban canopy (Q_F) represented approximately 5% of annual net radiation available in the urban environment ($Q^* + Q_F$) at sites 1, 2 and 3. The fractions of heat stored within the urban canopy (ΔQ_s), latent heat (Q_E) and sensible heat (Q_H) by the energy available in the urban environment in the dry season corresponded to 26, 28 and 46% in the Site 1 and 23, 30 and 46% in the wet season. In the Site 2, these fractions corresponded to 24, 31 and 45% in dry season, and 20, 46 and 33% in the wet season, while the Site 3, 28, 30 and 42% and 26, 32 and 45% respectively. The average daytime ($Q^* > 0$) of the Bowen ratio (β) in the dry season were 1.80, 1.51 and 1.66 for sites 1, 2 and 3, respectively, and 1.62, 0.75 and 1.68 in the wet season, which implies that the sensible turbulent fluxes were predominated on the latent heat fluxes in urban areas. Exception was verified in Site 2 during the rainy season due to the higher presence of vegetation around this site. It was noted that in the three sites, ΔQ_s and Q^* were in phase and that they described elliptical path in a counterclockwise direction. It was found that the rates of heat fluxes stored inside urban canopy and sensible heat fluxes are directly related to the fraction of impermeable flat area and inversely to the fraction of vegetated flat area in the vicinity of urban sites surveyed. The annual averages fractions for Q_E/Q^* were located above the theoretical curve established for temperate cities, while Q_H/Q_E and $Q_H/(Q^* - \Delta Q_s)$ were located below, which indicates the need for further research on the topic of cities in tropical climate. The results provide important insights for planning and management of cities as they may assist in the establishment of new criteria and recommendations that can be inserted in the master plan of the Cuiabá city in order to improve the quality of life of its population.

Keywords: Energy flux, Bowen ratio, urban canopy.

1. INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA

O homem é um dos principais agentes ocasionadores de modificações ambientais, sendo o território urbano o local onde se verifica os maiores impactos ocasionados pela ação antrópica sobre o meio ambiente. A substituição de áreas vegetadas por áreas edificadas, a impermeabilização do solo por concreto e asfalto, a alta concentração populacional das cidades, o uso intensivo do espaço urbano devido à concentração de atividades humanas, entre outros fatores, são responsáveis por profundas modificações na paisagem natural do meio urbano. Associado a isso, constata-se que as políticas públicas de gerenciamento e planejamento urbano ambientais têm obtido pouco êxito em promover o adequado ordenamento do uso e ocupação do solo nas cidades, o que de certa forma agrava ainda mais os problemas ambientais decorrentes da expansão urbana.

Os impactos ambientais pela ação antrópica no meio urbano modificam a qualidade do ar atmosférico, degradam o solo, poluem as água superficiais e subterrâneas, reduzindo desta forma a qualidade de vida de seus habitantes. Entre as principais consequências da degradação ambiental urbana, destaca-se a modificação imposta ao próprio clima local urbano que em virtude da intensa atividade humana acaba apresentando comportamento diferente daquele verificado nas zonas rurais adjacentes. É importante lembrar que o clima local é resultado da associação dos diversos microclimas existentes dentro da cidade. Desta forma, o conhecimento científico das condições microclimáticas dos espaços urbanos é de fundamental importância no sentido de evitar que estes sejam modificados indiscriminadamente.

Entre os principais efeitos climáticos observados nas cidades pode-se citar a intensa dissipação de energia no meio pelo uso de eletricidade, combustíveis fósseis e metabolismo humano, elevação da temperatura do ar, a diminuição da evapotranspiração devido à redução das áreas verdes, impermeabilização do solo e canalização de rios e córregos, bem como, aumento da poluição do ar ocasionado pelas atividades humanas de industrialização e transporte. Alguns dos efeitos apresentados são resultados em parte da modificação da paisagem natural principalmente por áreas edificadas e pavimentadas. A troca de superfícies naturais

por artificiais altera a rugosidade superficial do tecido urbano em virtude da própria natureza dos obstáculos existentes nesse meio (elevando a turbulência), modifica as propriedades radiativas das superfícies (albedo e a emissividade), bem como as propriedades térmicas do substrato (condutividade, capacidade e admitância térmica) e as hidráulicas do solo urbano (permeabilidade da superfície, condutividade e capacidade hidráulica). Todos estes fatores são responsáveis por profundas alterações no balanço de energia das cidades, pois interferem diretamente nos processos de troca de momento, massa e energia nas superfícies urbanizadas.

Além disso, nas cidades verifica-se que o armazenamento de radiação solar incidente (onda curta) é maior que no meio rural circundante em virtude da maior capacidade, condutividade e admitância térmica dos materiais artificiais utilizados nesse meio. Constata-se que os “Cânions Urbanos” são responsáveis por múltiplas reflexões de radiação de onda longa, o que contribui para que haja maior aprisionamento de energia dentro do dossel urbano, dificultado a sua dissipação para camadas atmosféricas superiores. Além do mais, as fontes antropogênicas de energia introduzem mais energia no meio urbano, contribuindo para que haja maior ganho e maior armazenamento de energia na cidade, o que traz como consequência, maior aquecimento do ambiente urbano, principalmente à noite, quando comparado com o meio rural que o rodeia, desencadeando o conhecido fenômeno de Ilha de Calor Urbana (ICU).

1.2 JUSTIFICATIVA

O balanço de energia na superfície é um processo físico e termodinâmico que acopla a superfície terrestre e a porção inferior da Troposfera, denominada de Camada Limite Atmosférica. É através do balanço de energia que são determinados os fluxos turbulentos verticais de calor sensível, latente e superficial (limitada aos primeiros milímetros da superfície), sendo estes responsáveis pela evolução dos perfis verticais de temperatura potencial e umidade específica do ar na camada limite atmosférica, bem como, o desenvolvimento da temperatura do solo nas camadas superficiais da superfície terrestre. Em virtude desse acoplamento, o balanço de energia de superfícies urbanizadas é uma das técnicas bastante utilizadas para avaliar o impacto da urbanização no clima das cidades. Apesar do balanço de energia em superfícies urbanizadas ser uma técnica bastante difundida nos países de clima

temperado (norte-americanos e europeus), constata-se que ela tem sido pouco utilizada em países de clima tropical, como é o caso do Brasil, onde outras técnicas têm sido preteridas, como análise espaço-temporal do vento, da Ilha de Calor Urbana, da composição química da atmosfera etc.

O Brasil tem apresentado intenso processo de urbanização, principalmente no último século, passando do rural na década de 1940 com 31,3% de taxa de urbanização, para o urbano, com 84% de sua população residindo em áreas urbanizadas. De forma análoga, ao se analisar processo de transformação urbana sofrido pela cidade de Cuiabá, capital do estado de Mato Grosso, percebe-se que o mesmo se iniciou na década de 1930, intensificou-se durante a década de 1960, transformando a capital mato-grossense em um dos principais centros de abastecimento para as áreas de alta produtividade agrícola da região do Cerrado e do sul da Amazônia. Em 1970, a população de Cuiabá era de 88.254 habitantes e em 2010 alcançou 551.350, alcançando uma taxa da urbanização de 98% do seu território urbano.

Esse intenso crescimento e concentração populacional favoreceram ao acelerado processo de mudanças ambientais, com alterações nas coberturas das superfícies do solo, principalmente, pela substituição das enormes áreas verdes preservadas em seu entorno por áreas construídas e impermeabilizadas. Estas modificações foram responsáveis por mudanças profundas no balanço de energia da cidade, causando, dentre outras consequências, influência na dinâmica do movimento do ar na região, aumento da temperatura do ar e o fenômeno de Ilha de Calor Urbana.

Apesar dos esforços em quantificar os efeitos da urbanização no clima da cidade, nota-se que ainda existe a necessidade de aprofundamento do conhecimento científico sobre os diversos microclimas da região no meio urbano, visto que o preenchimento das lacunas existentes pode ajudar a implementar ações ambientais que possam melhorar a qualidade de vida da população que reside nessa cidade, principalmente sob o aspecto do desconforto térmico, visto que o clima da cidade naturalmente impõe a presença constante na região de elevadas temperaturas do ar.

Nesse sentido, esta pesquisa objetivou avaliar temporalmente o microclima de três ambientes urbanos localizados em posições distintas da cidade de Cuiabá sob a óptica do balanço de energia, visto que esta abordagem ainda é de pouca utilização

no meio urbano no Brasil. Além de quantificar os fluxos verticais turbulentos de calor sensível e latente em cada tipo de microclima existente em cada sítio, o balanço de energia no meio urbano complementarmente permite avaliar quantidade de energia armazenada dentro dossel urbano, a evapotranspiração do entorno dos sítios, as taxas de destinação da energia disponível no meio, a razão entre os fluxos de calor sensível e latente etc. Estas informações são importantes, pois através delas é possível estabelecer relações entre as variáveis do balanço de energia com as características morfológicas de cada sítio urbano estudado, que podem permitir definir novas diretrizes para o uso e ocupação do solo no plano diretor da cidade, bem como sugerir a implantação de medidas mitigadoras do clima da cidade.

Para subsidiar o desenvolvimento da pesquisa proposta, os seguintes objetivos específicos necessitaram ser alcançados:

- a) caracterizar a morfologia dos sítios urbanos;
- b) estimar o calor antropogênico dissipado no dossel urbano;
- c) avaliar o fluxo de calor armazenado dentro do dossel urbano;
- e) adaptar a metodologia da Razão de Bowen para estimar os fluxos turbulentos no meio urbano;
- d) instrumentar e coletar os dados nos sítios urbanos;
- f) caracterizar as variáveis microclimáticas; e,
- g) avaliar os componentes do balanço de energia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CLIMA URBANO

O tempo pode ser definido como o estado médio da atmosfera em uma dada porção de tempo e em determinado lugar, enquanto o clima representa uma síntese do tempo em um dado lugar durante períodos mais longos (30-35anos) (AYOADE, 2007). O clima é influenciado por fatores globais (radiação solar, altitude, latitude, massas de ar e terra, ventos) e locais (topografia, vegetação e superfícies do solo), bem como por seus elementos (temperatura, umidade e movimento do ar e precipitação), sendo que os primeiros têm a qualidade de definir e os segundos de condicionar, determinar e dar-lhes origem (ROMERO, 2001).

O meio urbanizado se diferencia do meio natural pela ação antrópica que transforma os espaços da cidade, o que corrobora para modificar o clima local, gerando um clima próprio, o denominado “clima urbano”. A Sociedade Americana de Meteorologia (AMS, 2000) define Clima Urbano como sendo simplesmente “o clima afetado pela presença da cidade”. Conforme destaca Dumke (2007), o efeito da atuação humana ocorre devido às modificações por ela introduzidas direta e conscientemente no espaço, daquelas derivadas do espaço transformado e das atividades urbanas, corroborando para surgimento de um clima específico. O clima urbano é resultado das modificações que as superfícies naturais sofrem, da introdução de materiais não naturais nesse meio, da intensa atividade humana que introduz calor e poluentes na atmosfera, o que provoca alterações significativas nos fluxos de energia, massa e movimento (OKE, 1987). Por esse motivo, diz-se que o meio urbano é complexo e caracterizado por contínuo processo de mudança ocasionado por ações antrópicas, o que se traduz em alterações nos padrões atmosféricos locais, trazendo como consequência modificações na temperatura do ar, umidade, velocidade e direção dos ventos, quantidade de precipitação, e na sua composição química. Estas modificações não ficam restritas ao meio urbano e podem ser levadas para aos ambientes circunvizinhos a cidade, alterando os climas locais e projetando seus efeitos até os espaços sub-regionais devido ao efeito do vento que leva para regiões de sotavento as alterações climáticas introduzidas pela presença da cidade.

2.1.1 Natureza do Clima Urbano

O estudo do clima urbano pode ser realizado tanto pela meteorologia urbana quanto pela climatologia urbana. A primeira se preocupa com estudos dos processos físicos, químicos e biológicos que corroboram para mudar o estado atmosférico das cidades, enquanto a segunda, estuda os estados atmosféricos mais frequentes nas cidades (OKE, 1984).

A natureza do clima urbano foi expressa por Lowry (1977) através de equação matemática linear composta por três componentes que estabelece que os valores dos elementos do clima possam ser expressos de acordo com:

$$M_{i,t,x} = R_{i,t,x} + L_{i,t,x} + U_{i,t,x} \quad \text{Equação 1}$$

em que M representa os elementos do clima avaliados sob a presença de um determinado tipo de tempo “ i ” (condição sinóptica), em um momento “ t ”, em um determinado local do meio urbano “ x ” (normalmente uma estação meteorológica), R representa a componente regional, L a componente local devida aos fatores não urbanos e U a componente urbana propriamente dita. R representa os valores dos elementos do clima que seriam observados na presença de condições de topografia plana ou sem efeitos urbanos, sendo que L e U são os desvios em relação ao valor observado para R devido aos efeitos topográficos e da presença da região urbana. Da expressão proposta pelo autor, pode-se concluir que o clima urbano é resultado da interação entre fatores urbanos e locais físicos pré-existentes com o clima regional.

2.1.2 Formação e Características do Clima Urbano

O processo de urbanização produz mudança radical nas características radiativas, térmicas, de umidade e aerodinâmicas das superfícies, o que inevitavelmente produz mudanças no balanço de radiação e hidrológico, o que traz como consequência, modificações nas propriedades atmosféricas da região. Entre os processos e mecanismos relacionados à modificação dos balanços de energia e hídrico responsáveis pela formação do clima urbano, pode-se citar:

a) Fontes de calor antropogênico – O uso de energia para aquecimento das edificações, iluminação, transporte, uso industrial, dentre outros, introduzem no meio urbano uma enorme quantidade de energia, que é dissipado na atmosfera

urbana sob a forma de calor, o que contribui para que a mesma se aqueça. Por outro lado, a queima de combustíveis fósseis (gás natural, gasolina, óleo diesel, óleo combustível) e alguns processos industriais liberam uma enorme quantidade de vapor d'água no meio, o que pode em casos específicos aumentar a umidade do ar na composição atmosférica;

b) Impermeabilização das superfícies urbanas – A troca das superfícies naturais por edifícios e pavimentos (asfaltos e concreto) diminui a infiltração da água no solo e aumenta o escoamento das águas superficiais, reduzindo o armazenamento de água na superfície urbana, o que faz com que grande parte da energia disponível seja utilizada para aquecer as superfícies (fluxo de calor sensível), e conseqüentemente, a atmosfera, aumentando desta forma a temperatura do ar nesses ambientes. A retirada da vegetação do meio urbano reduz a evapotranspiração, um dos principais mecanismos de introdução de umidade na atmosfera;

c) Contaminação do ar urbano – A introdução de poluentes no ar atmosférico urbano contribui para que haja redução na radiação de onda curta, principalmente devido à absorção e difusão da radiação solar pelas partículas em suspensão. Por outro lado, essas partículas são responsáveis por absorver a radiação de onda longa (infravermelha termal) emitida pelas superfícies urbanas, o que resulta em maior emissão de onda longa pela atmosfera em direção à superfície terrestre. Outro aspecto a ser considerado é que essas atuam ainda como núcleos de condensação, aumentando assim a frequência de nevoeiros e de precipitações; e,

d) Cânions Urbanos – O tecido urbano, representado pelas dimensões, distribuição, volumetria e distância entre os edifícios e pela tipologia de ocupação dos edifícios, ruas e áreas verdes, pode ser simplificado de tal forma que se possa trabalhar com formas unitárias básicas que se repetem ao longo do dossel urbano. Estas formas básicas constituem os cânions urbanos que nada mais são do que unidades básicas do tecido urbano compostos por paredes e solo (normalmente uma rua ou avenida) contidos entre dois edifícios adjacentes. São nesses cânions que se processam os principais mecanismos de modificação do clima urbano, principalmente por serem compostos por materiais com diferentes propriedades térmicas, diferentes orientações solares, características aerodinâmicas (rugosidade) e maior área de exposição às radiações de onda curta e longa. Por exemplo, o arranjo

da geometria do cânion urbano (H/W – altura/largura) pode provocar reflexões múltiplas na radiação de onda curta o que causa a diminuição do albedo ($\sim 0,15$) o qual é menor que a maioria das paisagens rurais, com exceção das florestas e solos escuros (OKE, 1987). Logo, há maior disponibilidade de energia na forma de ondas curtas na cidade do que no meio rural. Por outro lado, essa mesma forma geométrica restringe a emissão de onda longa de dentro dos cânions urbanos para a atmosfera por causa do reduzido fator de visão do céu, o que faz com que essa energia seja reabsorvida e reemitida várias vezes dentro deste mesmo cânion urbano. Esses argumentos reforçam a ideia de que na cidade há um maior armazenamento de energia.

Uma das formas de se observar as características do clima urbano é compará-lo com o meio rural adjacente. As alterações nas variáveis climáticas decorrentes da urbanização podem ser obtidas fazendo diferenças entre as observações meteorológicas urbanas e rurais ($\Delta_{i,t,u-r} = M_{i,t,u} - M_{i,t,r}$). De um modo geral, observa-se que o processo de urbanização reduz a incidência da radiação solar, diminui velocidade do vento devido ao aumento de rugosidade das superfícies e reduz a umidade do ar devido a impermeabilização das superfícies e supressão da vegetação, e por outro lado, de maneira inversa, aumenta a temperatura do ar devido ao maior armazenamento de energia nos cânions urbanos, a poluição atmosférica, a nebulosidade e precipitação devido a maior concentração de poluentes no ar. Todos esses efeitos introduzidos pelas mudanças microclimáticas provocadas pela ação humana na superfície urbana são responsáveis pelo fenômeno mais conhecido e documentado na literatura, a Ilha de Calor Urbana.

2.1.3 Escalas Espaciais e Temporais do Clima Urbano

Inicialmente, é importante destacar que as distinções espaciais discretas apresentadas em vários trabalhos foram estabelecidas para efeito didático de tal forma que se possa estabelecer conceitos e terminologias ao estudo dos fenômenos atmosféricos, na grande maioria dos casos baseada em escalas dos sistemas de circulação meteorológica. No entanto, deve-se destacar que os fenômenos atmosféricos, que vão desde as zonas planetárias até os sistemas de ventos locais, constituem um espectro contínuo dos sistemas climáticos (AYOADE, 2001). Desta

forma, conforme destaca Mendonça e Danni-Oliveira apud Dumke (2007), o estudo de um clima particular requer a compreensão dos controles climáticos aos quais está submetido, uma vez que os aspectos da escala planetária ou zonal, via circulação primária, definem os controles climáticos dos quais dependem os aspectos da escala regional, via circulação secundária. Estes, por sua vez, condicionam o clima na escala local, dado pela circulação terciária.

Não há um consenso a respeito da organização das escalas espaciais e temporais nos estudos do clima. Desta forma, é possível encontrar grande variação nas diversas abordagens sobre a organização dessas escalas (NUNES, 1998). Utilizando o trabalho de Orlansky (1975) como referência, pode-se definir os fenômenos atmosféricos como sendo de *microescala*, com dimensão típica horizontal de até 2 km, com variação temporal de minutos ou horas; de *mesoescala*, entre 2 a 2000 km, com variação temporal na ordem de várias horas ou dias; e *macroescala*, maior que 2000 km, com variação temporal na ordem de semanas ou meses (Figura 1). A escala espacial apresenta por Orlansky (1975) é derivada de resultado empírico, o que torna arbitrária a compartimentação pela escala horizontal. O autor considera o uso da escala de tempo mais problemática do que a escala espacial, devido a processos físicos que tornariam a classificação ambígua (NUNES, 1998).

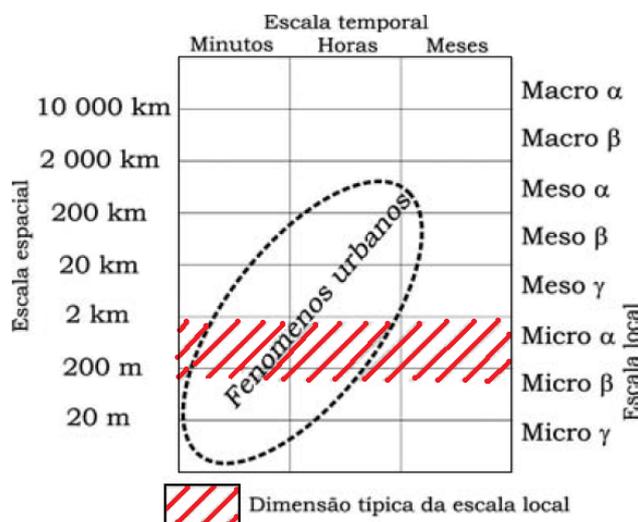


Figura 1– Dimensões espacial e temporal típicas dos fenômenos atmosféricos segundo Orlansky apud Andrade (2005)

Sob a escala temporal, é importante se ter em mente que, conforme destaca Andrade (2005), o tipo de tempo condiciona a variação espacial dos elementos climáticos no espaço urbano, sobretudo através do vento, da nebulosidade e da

estabilidade vertical da atmosfera. O autor descreve que sob fluxo sinóptico forte, as diferenças locais são suprimidas, e na presença de céu limpo e vento fraco, os efeitos locais e microclimáticos controlam as condições climáticas da camada inferior da atmosfera.

Com relação à escala espacial, é importante mencionar que os termos topoclina e clima local são muito utilizados para designar climas de áreas homogêneas quanto à ocupação do solo e/ ou condições topográficas. Não há um consenso entre os pesquisadores quanto às dimensões típicas desses climas. No entanto, pode-se dizer que topoclina e clima local são sinônimos e compreendidos entre os microclimas β e γ da escala proposta por Orlansky (1975), correspondendo a áreas de algumas dezenas a algumas centenas de metros. A área tracejada em vermelho na Figura 1 pode ser utilizada como referência na definição dos climas locais.

Com intuito de fornecer subsídios para se obter observações meteorológicas representativas em sítios urbanos, Oke (2006) apresenta três escalas horizontais que usualmente são utilizadas para os estudos urbanos:

a) Microescala – é a escala típica dos microclimas urbanos relacionada com as dimensões individuais de edifícios, árvores, ruas, avenidas jardins, quintais, etc que se estende desde menos de um metro até centenas de metros. A influência desses elementos se restringe a camada do dossel urbano (Figura 3);

b) Clima Local – é formado pelo mosaico de microclimas que se repetem com certa regularidade. Correspondem aos climas que estejam situados em condições similares de uso e ocupação do solo, ou seja, com o mesmo tipo de cobertura, tamanho e espaçamento das edificações e mesmo tipo de atividade. Por este motivo, representam a integração dos efeitos característicos dos diversos microclimas que se originam da área de contribuição na vizinhança do sítio onde estes estão sendo aferidos. A área de contribuição pode ser entendida como a porção da superfície a barlavento que contribui com as principais propriedades dos fluxos (por exemplo, sensível e/ou latente) ou das concentrações meteorológicas (por exemplo, temperatura e/ou umidade) que estão sendo medidas (SCHMID, 1997, 2002). Estendem-se desde um a alguns quilômetros.

c) Mesoclima – Compreende os vários climas locais, ou seja, a influência integrada da cidade, ao nível da camada limite urbana (Figura 3). É importante lembrar que os efeitos extra-urbanos de escala climática superior (mesoescala β e α , bem com os de macroescala – Figura 1) afetam e influenciam o clima das cidades.

A divisão da atmosfera urbana vertical apresentada por Oke (1984, 1987, 2006) é bastante utilizada atualmente para explicar os fenômenos que ocorrem no meio urbano (Figura 3). Devido a sua importância para o presente trabalho, elas serão detalhadas com maior profundidade nos itens 2.2 e 2.3 desta tese. De forma bem simplificada, no meio urbano é possível distinguir abaixo do nível médio dos telhados das edificações a camada do dossel urbano (UCL) que representa a interação entre a atmosfera e os elementos urbanos (espaço intra-urbano, microescala). Logo acima, encontra-se a camada inferior da camada limite urbana, a subcamada rugosa (SR ou RSL) onde os fluxos são influenciados pela rugosidade dos elementos individuais. Mais acima, encontra-se a camada limite urbana (CLU ou UBL) que representa a interação da atmosfera com o conjunto da cidade (mesoescala). Ela integra a influência termo-higrométrica de toda cidade e pode se estender a sotavento da área urbana, formando o que se chama de “pluma urbana”.

2.2 A CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA (CLA) E SUAS SUBDIVISÕES

O estudo da camada mais baixa da atmosfera (a Troposfera) é importante, pois é ela que está em contato direto com as superfícies urbanas e nela se desenvolvem os principais fenômenos físicos e termodinâmicos que interferem diretamente no clima das cidades. A superfície da Terra consegue exercer influência na atmosfera até a camada da Troposfera, distante aproximadamente 10 km da superfície. No entanto, durante muitos períodos do dia, esta influência fica restrita a uma camada mais baixa denominada de camada limite atmosférica ou planetária (CLA ou CLP). Esta camada pode ser definida como a porção inferior da Troposfera na qual a influência da camada superficial se anula ou cessa, ou ainda, a camada onde as forças cisalhantes provocadas pela presença da rugosidade superficial são ainda significativas (OKE, 1987; FOKEN, 2008). Essa camada é caracterizada por

intensa turbulência ou mistura gerada pelo o atrito da atmosfera quando esta se move sobre a superfície rígida e rugosa da terra.

De acordo com Harman (2003) é na CLA que as propriedades dinâmicas e termodinâmicas médias sofrem variação em escala de tempo igual ou inferior uma hora. Nela, são recebidas a maior parte do calor, água e poluentes proveniente da superfície terrestre através do processo denominado de turbulência. Conforme destaca Oke (1987), a altura da CLA é variável durante o dia, quando a atmosfera se encontra instável, pode alcançar cerca de 1 a 2 km, principalmente devido à transferência de umidade e calor da superfície terrestre para a atmosfera. Durante a noite, quando a atmosfera se encontra estável, devido ao resfriamento mais rápido da superfície terrestre do que da atmosfera, existe a tendência de supressão da turbulência e a CLA pode diminuir a algumas centenas de metros.

Outra característica importante da CLA é a variação espacial dos fluxos verticais turbulentos de calor sensível e calor latente e de momento, o que de certa forma, influencia a estrutura vertical de temperatura, umidade e vento dentro desta camada (STULL, 2000). A Atmosfera Livre (AL) se situa imediatamente acima da CLA e apresenta a característica de escoamento laminar, pois os efeitos da fricção aerodinâmica, aquecimento e resfriamento da superfície terrestre são poucos sentidos, pois nela não mais há influência da camada superficial terrestre. Nessa camada, a velocidade do vento atingiu o seu valor geostrófico, sendo constante com a altura. A turbulência pode ser ignorada e os fluxos de escala sinótica preponderam sob os fluxos gerados localmente (HOLTON, 2004).

Em condições de topografia plana e solo horizontalmente homogêneo, é comum dividir a CLA em camadas. Assim, durante o dia (Figura 2a), devido ao processo de convecção e da rugosidade superficial, observa-se a formação de três camadas distintas: a) Camada Limite Superficial (CLS), onde as forças inerciais predominam sobre as viscosas, com espessura da ordem de dezenas de metros, onde ocorrem gradientes verticais intensos das variáveis atmosféricas médias: temperatura, vapor de água (umidade específica do ar, razão de mistura), momento (velocidade do vento); b) Camada de Mistura Convectiva (CM), camada em que ocorre grande mistura devido à difusão turbulenta, que durante o período convectivo da CLA estende-se desde o topo da CLS até o topo da CLA (zona de entranhamento ou de

transição), na qual os gradientes verticais médios das variáveis atmosféricas sofrem pequena variação; e a Camada Transição ou Zona de Entranhamento (CE), camada no topo da CLP, na qual ocorre a transição entre as condições médias das variáveis na CLP e CM e as condições laminares na atmosfera livre (AL), onde não ocorre turbulência fora das regiões instáveis (de cisalhamento do vento) e das térmicas que formam as células de movimento vertical das nuvens. Por outro lado, durante a noite (Figura 2b), a CLA se torna estável e o processo de turbulência acontece mecanicamente pelo cisalhamento do vento na vertical. Acima desta camada, de acordo com Harman (2003), observa-se a redução gradativa da intensidade da turbulência ocasionada pela estratificação térmica estável que foi induzida pelo resfriamento radiativo da superfície e dissipação molecular. Remanescente da Camada de Mistura Diurna (CM), imediatamente acima da CLA estável, é comum se verificar a presença de uma Camada de Mistura Residual (CMR), caracterizada pela ausência de turbulência e a presença de jatos de baixos níveis (ARYA, 2001).

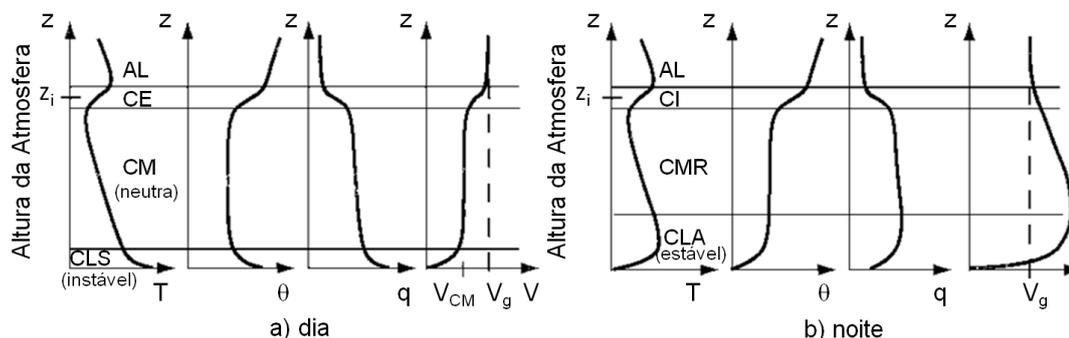


Figura 2 - Camadas da CLA em resposta ao aquecimento e resfriamento da superfície. As variáveis T , θ , q e V_{CM} e V_g e z_i são respectivamente, temperatura do ar, temperatura potencial, umidade específica do ar, velocidade do vento na camada de mistura, vento geotrópico e altura da camada limite

Fonte: Adaptado de Foken (2008)

2.3 A CAMADA LIMITE URBANA (CLU)

O ar atmosférico ao fluir de superfícies rurais para urbana forma outra camada limite interna denominada de Camada Limite Urbana (CLU) que se desenvolve a partir da direção dos ventos dominantes na região (Figura 3). Pode-se dizer que a CLU nada mais é do que CLA sobre regiões urbanas. A formação da CLU é um fenômeno meso-climático, mas que também se desenvolve em escala local conforme destacam Piringer et al. (2002). A estrutura vertical da CLU é semelhante à CLA no período diurno, apresentando três camadas adjacentes e com

características similares: a CLS, CM e CE. Assim, a CM sobre as áreas urbanas apresentam variação linear do fluxo vertical turbulento de calor sensível e a temperatura média potencial permanece constante com a altura (Figura 2a). Conforme relatam Roth e Oke (1995), é comum se utilizar a espessura da CM como forma de avaliar a extensão vertical da CLU. A CE apresenta comportamento semelhante ao observado na CLA. No entanto, poucas pesquisas foram realizadas com intuito de esclarecer melhor as propriedades dessa camada sobre regiões urbanas (HARMAN, 2003). Com relação ao período noturno, a CLU apresenta configuração semelhante à CLA estável típica das regiões homogêneas e planas descritas anteriormente (Figura 2b). É comum em algumas regiões urbanas se observar o aparecimento de convecção térmica durante o período noturno resultante da liberação do calor armazenado no dossel urbano e/ou gerado pela atividade antropogênica (processo de combustão, consumo de eletricidade etc), o que pode intensificar a mistura turbulenta e desenvolver à noite uma camada de mistura. No entanto, de acordo com Collier (2006), é mais comum que aconteça na maioria das áreas urbanas o resfriamento radiativo da superfície em virtude do incremento do fluxo de calor sensível (negativo para cima) induzido pela maior intensidade da turbulência sobre as regiões urbanas.

Devido sua complexidade, a CLS se estrutura de tal forma que podem ser identificadas quatro subcamadas (PIRINGER et al., 2002; HARMAN, 2003): a Camada de Mistura (CM), Subcamada Inercial (SI ou ISL), Subcamada Rugosa (SR ou RSL) e Camada do Dossel Urbano (CDU ou UCL) (Figura 3). A Camada de Mistura se comporta de forma análoga à Camada de Mistura Convectiva pertencente à CLA, onde as propriedades dinâmicas e termodinâmicas médias sofrem rápida mistura, o que resulta em perfis horizontais e verticais homogêneos. De acordo com Roth (2000), muito pouco se sabe sobre as diferenças entre a CM rural e a urbana. A Subcamada Inercial (SI ou ISL) representa a porção da CLS urbana em que os fluxos de momento, calor e umidade apresentam a característica de serem horizontalmente homogêneos e uniformes na vertical. Segundo Rotach (1993), essa camada é representativa da média espacial dos fluxos que acontecem na superfície e nela os fluxos obedecem a Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov. Oke (2006) afirma que nela os fluxos são constantes e a média dos valores das propriedades

meteorológicas são invariantes horizontalmente. É a camada ideal para se realizar as medições de fluxos e das variáveis padrões meteorológicas dentro do meio urbano. A Subcamada Rugosa (SR ou RSL) é influenciada diretamente pela rugosidade dos elementos que compõem a camada do dossel urbano. Os fluxos são espacialmente heterogêneos e dependentes da escala de comprimento local, tais como largura, altura, separação e geometria das edificações (HARMAN, 2003). A Camada do Dossel Urbano (CDU ou UCL) é mais rugosa e está situada abaixo da altura média dos edifícios. Nela, os fluxos são espacialmente heterogêneos e sujeitos a forças de arrasto proveniente do contato do fluxo de ar com o meio urbano (altura, espaçamento, geometria dos edifícios, presença de árvores etc). Deve-se evitar realizar medições meteorológicas urbanas nessa camada, pois ela está sob forte influencia das dimensões individuais dos edifícios, das árvores, das ruas, das avenidas, dos jardins, etc.

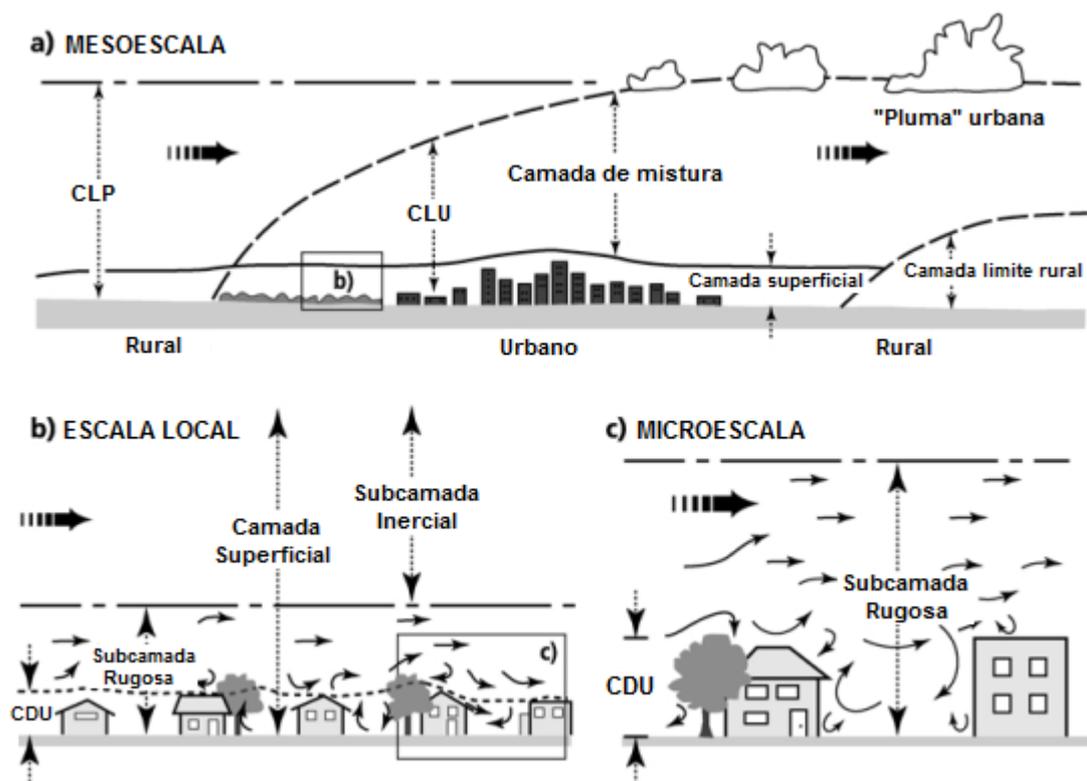


Figura 3 – Representação esquemática da Camada Limite Urbana (CLU), incluindo escalas e camadas verticais

Fonte: Adaptado de Piringer et al. (2002)

A extensão vertical das subcamadas urbanas é objeto de estudo de inúmeros trabalhos. Análises de túnel de vento indicaram heterogeneidade dos fluxos

horizontais abaixo de 1,8 a 5,0 vezes a altura média dos edifícios (HARMAN, 2003). A profundidade da subcamada rugosa é dependente da distância que separa os edifícios e da forma dos mesmos (RAUPACH, et al., 1980; RAFAILIDIS, 1997). Isso faz com que a maioria das observações meteorológicas permaneça dentro da Subcamada Rugosa, quando o ideal seria instalar os sensores acima desta subcamada, dentro da Subcamada Inercial. Roth (2000) afirma que a espessura da Subcamada Inercial é muito fina, da ordem de $0,1z_i$ (da altura da camada limite). Segundo o mesmo autor, é possível que a mesma nem exista em condições de instabilidade atmosférica quando os efeitos da heterogeneidade superficial urbana estão misturados na vertical ou quando a altura dos edifícios varia e a Subcamada Rugosa é então forçada a se reduzir (CHENG e CASTRO, 2002).

2.4 BALANÇO DE ENERGIA EM SUPERFÍCIES URBANAS

O balanço de energia na superfície é um processo físico e termodinâmico que acopla a superfície e a Camada Limite. Através dele são determinados os fluxos de calor e umidade, bem como os superficiais, que contribuem de forma significativa no perfil médio de temperatura potencial dentro da Camada Limite Atmosférica. Sobre a superfície urbana, as intensidades de turbulências são maiores do que nas áreas rurais (ROTH, 2000; ROTACH, 1993), principalmente devido à natureza dos obstáculos existentes no meio, o que indica que os fluxos de calor e umidade são mais dependentes da natureza da turbulência existente dentro da camada limite.

As áreas urbanas não só alteram a turbulência, mas também o armazenamento de radiação solar incidente (onda curta) que acaba sendo maior em virtude dos materiais que são utilizados nesse meio (com alta capacidade térmica), muito deles criados artificialmente pelo homem. As múltiplas reflexões de radiação de onda longa que acontecem dentro dos denominados “Cânions Urbanos” contribuem para aprisionar a energia dentro do dossel urbano, dificultado a sua dissipação para camadas atmosféricas superiores.

Diferentemente do que acontece nas áreas rurais, a cidade apresenta outras fontes de energias, as denominadas fontes antropogênicas, que contribuem para introduzir mais energia no meio urbano, aumentando ainda mais os ganhos de energia dentro do dossel urbano. As causas apresentadas contribuem para que haja maior ganho e maior armazenamento de energia na cidade, o que traz como

consequência, o maior aquecimento do ambiente urbano, principalmente a noite, quando comparado com o meio rural que o rodeia.

Assim, Oke (1987), a partir de um volume de controle e fazendo uso da primeira Lei da Termodinâmica (Lei de conservação de energia), computou os ganhos, as perdas e o armazenamento de energia no dossel urbano e formulou a equação do Balanço de Energia para todas as superfícies inseridas dentro de volume de controle pré-definido:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad \text{Equação 2}$$

sendo, Q^* o saldo de radiação ($K_{\downarrow} - K_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow}$), Q_F a fonte de calor antropogênica introduzida dentro do volume de controle, Q_H o fluxo de calor sensível turbulento, Q_E o fluxo de calor latente turbulento, ΔQ_S o fluxo de calor armazenado dentro do dossel urbano e ΔQ_A a advecção horizontal de calor sensível e latente conduzida para dentro ou fora do volume de controle (Figura 4), K_{\downarrow} radiação de onda curta incidente, K_{\uparrow} radiação de onda curta refletido, L_{\downarrow} radiação de onda longa emitida pelo céu e L_{\uparrow} radiação de onda longa emitida pela superfície, todas consideradas dentro do volume de controle.

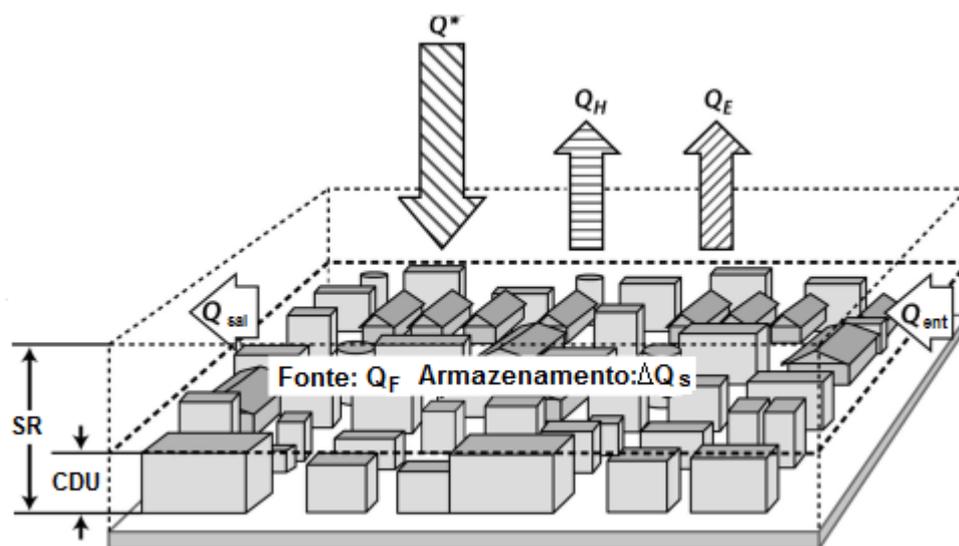


Figura 4 – Ilustração esquemática dos componentes do balanço de energia no volume de controle (*superfície + edifícios + ar*) definido por Oke (1987). O balanço de energia superficial por unidade de área sobre o topo do volume de controle é dado por $Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$, sendo que $\Delta Q_A = Q_{sai} - Q_{ent}$ é a advecção horizontal que pode acontecer dentro do dossel urbano. SR é a Subcamada Rugosa e a CDU (Urban canopy layer) é a Camada do Dossel Urbano

Fonte: Modificado de Oke (1988)

Ao se aplicar o modelo de volume de controle proposto por Oke (1988), algumas implicações são introduzidas no modelo e precisam ser comentadas. A primeira é que a absorção e a liberação de energia pela intervenção do ar no interior do volume de controle é incorporada juntamente com o fluxo de calor do solo pelo termo denominado de armazenamento (ΔQ_S). Outro aspecto importante a ser comentado é que pode haver introdução ou retirada de energia pelas faces laterais do volume de controle, o qual se denomina de fluxo advectivo (ΔQ_A). A emissão da energia antropogênica, gerada em vários pontos do volume de controle, pode ser incorporada explicitamente ao balanço de energia proposto; no entanto, de forma mais simplificada, sobre toda a superfície do volume. É importante mencionar que essas simplificações podem impedir que os processos físicos que governam o balanço de energia não sejam acessados de forma precisa, como por exemplo, quando se pretende avaliar a dependência dos termos do balanço energia em relação à morfologia urbana que está sendo estudada.

Devido à complexidade das superfícies urbanas, a Equação (2) não pode ser resolvida ponto a ponto na superfície urbana. Existem algumas alternativas para se avaliar os fluxos energéticos em áreas urbanas: a primeira, através de observações de campo, onde torres meteorológicas são instaladas em locais previamente definidos dentro da cidade. Essa é a técnica utilizada nesse trabalho. Outra técnica bastante difundida é a utilização de modelos numéricos de dossel urbano (MDUSs) acoplados a modelos de mesoescala, conforme destaca Marciotto (2008). Uma variedade de técnicas podem ser utilizadas para modelar o balanço de energia nas cidades através dos MDUSs. As mais simples são os modelos de lajes onde a superfície urbana é aproximada a uma única superfície com característica própria ao da área urbana em estudo (como em BEST, 1998a; VU et al., 2002). Uma importante limitação é que esses modelos não são capazes de incorporar explicitamente a morfologia do meio urbano.

Os modelos mais complexos usam o modelo de superfície urbana unitária genérica capaz de interceptar os vários níveis existentes no modelo atmosférico (como, por exemplo, em MARTILLI et al., 2002; MARTILLI, 2002). Desta forma, a influência da superfície urbana pode se espalhar na vertical de forma mais realística. Para tanto, a morfologia urbana média da área de estudo (normalmente um bairro ou

parte da cidade) é incorporada explicitamente no modelo. No entanto, apesar dos avanços conseguidos, esse modelo não consegue capturar com fidedignidade os finos detalhes existentes na superfície urbana.

Outra técnica importante é a dos experimentos em laboratório, como por exemplo, o túnel de vento e os tanques de água. No entanto, elas são mais utilizadas para estudar a Camada Limite Atmosférica, pois a partir desses experimentos é possível prever o padrão de escoamento ao nível do dossel urbano. Apresentam a vantagem de propiciar o controle das condições experimentais, dificilmente conseguidas em observações de campo, como quando se utilizam estações meteorológicas. Por último, pode-se citar o sensoriamento remoto que permite fazer o estudo dos fluxos energéticos em extensas áreas ou mesmo todo o território em estudo. Entretanto, os métodos utilizados para derivar os fluxos a partir do balanço de energia via sensoriamento remoto em áreas urbanas ainda estão sendo desenvolvidos (KATO e YAMAGUCHI, 2007; XU et al., 2008). A escala espacial ideal para fazer tais observações, bem como a precisão relativa das diferentes abordagens utilizadas ainda não foram devidamente deduzidas e documentadas (OFFERLE, 2003).

Várias medições de campo têm sido realizadas ao longo dos anos com intuito de observar e entender o comportamento do balanço de energia nas áreas urbanas. Um dos trabalhos pioneiros sobre o tema foi o de Oke e Yap (1974), no qual foram realizadas medições de fluxo de calor sensível sobre o telhado de um edifício escolar localizado na cidade de Vancouver, Canadá no período de verão em julho de 1972. Os resultados indicaram que grande parte da energia disponível foi armazenada no tecido urbano, não só nos telhados, mas nos edifícios, paredes, ruas etc. Anos depois, Nunez e Oke (1977) estudaram em setembro de 1973 o comportamento dos fluxos energéticos em um “cânion urbano” constituído por paredes e chão (rua ou avenida) entre dois edifícios adjacentes localizado a sudoeste da região central da cidade de Vancouver, Canadá. O particionamento dos fluxos energéticos do sistema “cânion urbano” mostrou que 60% da radiação disponível no meio foi dissipada na forma de calor sensível para o ar, 30% era armazenada nos materiais que compõem o cânion urbano e 10% foi consumido na evaporação da água presente no solo. Em Oke et al. (1980) foi estudado o comportamento dos fluxos energéticos no subúrbio, ao sul de

Vancouver, Canadá durante o mês de setembro de 1977 (verão). Os fluxos energéticos foram estimados através dos gradientes de entidades medidas, no caso temperatura e umidade específica do ar em pelo menos dois níveis e através de relações entre os fluxos do calor sensível e latente, através do método denominado de Razão de Bowen ($\beta = Q_H/Q_E = \gamma\Delta T/\Delta e$ – ver item 2.4.3 para maiores detalhes). Os resultados indicaram que o balanço de energia nas áreas suburbanas apresentou comportamento intermediário entre o meio urbano e rural, sendo que a média diária da razão de Bowen variou de 0,5 a 1,0, com picos diários em torno de 2,5. Constatou-se que o fluxo de calor sensível se encontra em fase com o saldo de radiação.

Anos depois, no verão de 1983, Cleugh e Oke (1986) realizaram medições de fluxos energéticos simultaneamente em meio rural e suburbano na mesma cidade de Vancouver. Os resultados indicaram que ao se comparar a área rural com a suburbana, houve aumento de 4% no saldo de radiação, 51% no fluxo de calor sensível e 46% de decréscimo no fluxo de calor latente nas áreas suburbanas.

Mais tarde, Schmid et al. (1991) realizaram estudo em uma área “homogênea” no subúrbio da cidade de Vancouver e demonstraram que os fluxos energéticos podem variar horizontalmente de 25 a 45% em uma escala espacial da ordem de 100 a 1000m. Dando sequência aos estudos, Grimmond et al. (1993) apresentaram trabalho comparando ambiente rurais e suburbanos na cidade de Sacramento, Califórnia em agosto de 1991. O particionamento diário dos fluxos de calor sensível, latente e no solo (dossel urbano para o site suburbano) foi de 0,53, 0,44 e 0,05, respectivamente do saldo de radiação para o sítio suburbano, de 0,9, 0,03 e 0,02 para o sítio rural sem irrigação e 0,08, 0,79 e -0,01 para o sítio rural com irrigação. A razão de Bowen ($\beta=Q_H/Q_E$) média foi de 1,24 para sítio suburbano, 40 no sítio rural sem irrigação e 0,1 para o irrigado. Através deste estudo, foi possível demonstrar as modificações introduzidas no balanço de energia devido ao processo de urbanização.

Em um trabalho reunindo várias medições de campo, Grimmond e oke (1995) apresentaram dados de fluxos de energia em áreas suburbanas de quatro cidades norte americanas: Tucson, Sacramento, Chicago e Los Angeles. As magnitudes dos fluxos variaram consideravelmente entre as cidades, como era esperado. Contudo,

observou-se que existe similaridade no particionamento dos fluxos energéticos, bem como nos horários de picos e nas mudanças de sinais.

Em trabalho subsequente semelhante ao anterior, Grimmond et al. (1999) ampliaram a quantidade de sítios estudados para nove (Chicago, Illinois; Los Angeles, California; Cidade do México, Distrito Federal; Miami, Florida; Sacramento, California; Tucson, Arizona; e Vancouver, Canadá). As observações foram realizadas em áreas de subúrbio, industriais e centrais, ou seja, com diferentes uso e ocupação do solo e com diferentes condições sinóticas em virtude do posicionamento dos sítios. Os resultados indicam que o fluxo de calor armazenamento no dossel urbano é um componente significativo do balanço de energia de superfície em todos os locais estudados, sendo os maiores valores encontrados nas regiões centrais e nas industriais.

Dentre os sítios estudados no trabalho apresentado por Grimmond et al. (1999), um deles se localiza nas proximidades da região subtropical com clima 'Aw', na cidade de Miami, USA. A este site será dada especial atenção em virtude de sua localização e clima, visto que o mesmo apresenta características semelhantes aos sítios pesquisados neste trabalho. Os dados de Miami foram coletados de maio a junho no ano de 1995 em região suburbana da cidade e o valor diário da razão de Bowen encontrado foi de 1,55, e os fluxos de calor sensível e calor armazenado no dossel urbano representaram aproximadamente 42% e 30% do saldo de radiação diário.

A partir de 1999, percebe-se que houve uma tendência de as pesquisas se deslocarem para outras regiões com vistas a observar o comportamento dos fluxos energéticos em diferentes climas, em especial os sub (tropicais), visto que grande parte das pesquisas havia sido realizada em regiões de clima temperado. A Europa passa a receber especial atenção nesse período também.

Até o início da década de 1990, a maioria das observações realizadas se restringia a locais com latitudes elevadas e com climas temperados. Provavelmente um dos primeiros trabalhos realizados em região (sub) tropical foi apresentado por Jauregui et al. (1992) com base em um estudo pioneiro realizado em área urbana na Cidade do México em 1985. Os resultados obtidos nesta cidade tropical de altitude elevada são semelhantes aos das cidades com clima temperado em relação à

magnitude da razão de Bowen, a variação diurna no saldo de radiação e no particionamento dos fluxos de calor sensível. Por outro lado, observou-se que o armazenamento de calor no dossel urbano é muito maior do que no caso das cidades de clima temperado e que o particionamento do fluxo de calor sensível e o fluxo condutivo de calor no dossel urbano apresentam características semelhantes em termos de intensidade. A partir de então, alguns trabalhos foram desenvolvidos em regiões subtropicais.

Em estudo realizado em 1993, Jauregui et al. (1999) avaliaram o balanço de energia em área densamente construída na Cidade do México durante a estação seca em dezembro de 1993. Verificou-se que, durante o dia, o fluxo de calor latente é pequeno e que razão do Bowen é elevada (> 8), sendo que grande parte da energia disponível no meio foi utilizada para aquecer o dossel urbano (~58%), e que o fluxo convectivo introduzido na atmosfera foi reduzido a um valor menor do que esperado, apenas 38%.

Barradas et al. (1999) apresentaram estudo realizado em área vegetada suburbana localizada ao sul da Cidade do México durante as estações seca e chuvosa em maio, junho e julho de 1995, sendo os valores médios de razão de Bowen obtidos foram de 1,92 e 0,04, respectivamente, comportamento este que pode ser atribuído à disponibilidade de água e à fenologia das plantas do local estudado.

Garcia-Cueto et al. (2003), coletaram dados de fluxos de energia na cidade de Mexicali (área de deserto), em área suburbana e rural durante o período de 18 a 22 de Março de 2001. Os valores médios dos fluxos de calor sensível, fluxos de calor latente e calor armazenado no dossel urbano ou no solo foram de 56%, 11% e 33% do saldo de radiação para a área suburbana, e 38%, 61% e 1% do saldo de radiação para a área rural, apresentando comportamento diferente do observado em Tucson, região também de deserto nos Estados Unidos.

Em Tejeda e Jauregui (2005) foi realizada uma revisão das medições de balanço de energia realizadas na Cidade do México, além de apresentar dados referentes a uma nova campanha realizada na Escola Preparatória, região central da cidade em dezembro de 1998. Foi observado comportamento semelhante ao site estudado em Jauregui et al. (1999), sendo que o calor armazenado no dossel urbano e os fluxos de calor sensível e latente não ultrapassaram mais do que 48%, 51% e

0,5%, respectivamente do saldo de radiação. Saindo da América Central, Orffele et al. (2005) realizaram medições de fluxos energéticos em área residencial na cidade de Ouagadougou, Burkina Faso, Oeste da África e sul do Saara, cidade de clima tropical, no período de 8 a 20 de fevereiro de 2003. O valor médio diário da razão de Bowen foi de 2,5, enquanto os dos fluxos energéticos de calor sensível, latente e do calor armazenado no dossel urbano foram de aproximadamente 57%, 23% e 20%, respectivamente do valor do saldo de radiação.

Com relação a estudos realizados na Europa, alguns trabalhos de destaque podem ser citados. Grimmond et al. (2004) estudaram o comportamento dos fluxos energéticos na cidade Marseille, França, em junho e julho de 2001. Os resultados demonstraram que o particionamento dos fluxos energéticos durante o dia foram da ordem de 69%, 17%, 27% para os fluxos de calor sensível, latente e calor armazenado no dossel urbano, respectivamente e a razão de Bowen média diária igual a 4,17.

Em Christen e Vogt (2004) são apresentados estudos de Balanço de Energia em sete sítios Europeus localizados nas proximidades e no interior da cidade de Besel, Suíça. A rede de sítios meteorológicos (BUBBLE) permitiu comparações simultâneas em três áreas urbanas, uma suburbana e três rurais durante o período de verão de 10 de junho a 10 de julho de 2002. Durante o dia, os valores médios dos fluxos de calor latente foram de 20%, 30% e 60% do saldo de radiação, para os sítios urbano, suburbano e rural, respectivamente. Com relação aos fluxos de calor sensível, os valores médios diários alcançaram 50%, 40% e 30% do saldo de radiação, para os sítios urbano, suburbano e rural, respectivamente. Os valores médios diários da razão de Bowen para os sítios urbanos variaram de 2,28 a 4,27, enquanto para o site suburbano, o valor médio determinado foi de 1,23 e para os sítios rurais, de 0,11 a 0,15.

Fortuniak et al. (2005) realizam estudo de fluxos de energia em quatro regiões (central, industrial, residencial e rural) da cidade de Pódz, Polônia, no mês de agosto de 2002. Os autores demonstraram que existe relação inversa entre razão de Bowen e a fração de vegetação observada nos sítios estudados (rurais e urbanos), apesar do grande desvio observado nos dados. Por outro lado, a razão entre o fluxo de calor sensível e energia disponível no meio ($Q_H / Q^* - \Delta Q_S$) se mostrou positivamente

correlacionada com a área impermeabilizada observada nos sítios estudados. Os valores dos fluxos energéticos diários de calor sensível, latente, armazenado no dossel urbano em relação à energia disponível no meio e razão de Bowen para a região central da cidade foram de 44%, 24%, 32% e $\beta=1,83$, para o site industrial de 36%, 42%, 22% e $\beta=1,61$, para o site residencial de 30%, 38%, 32% e $\beta=0,80$ e para o sítio rural de 22%, 44%, 24% e $\beta=0,41$.

Vesala et al. (2008), em estudo pioneiro na Cidade de Helsinki, Finlândia, avaliaram a intensidade dos fluxos de calor sensível, latente e de carbono no período de dezembro de 2005 a agosto de 2006. Os valores médios diários do fluxo de calor sensível para o site urbano excederam os de calor latente, alcançando 300 W m^{-2} no verão e 100 W m^{-2} no inverno. Durante o verão, o fluxo de calor latente não alcançou 100 W m^{-2} e no inverno não chegou a 30 W m^{-2} . A razão de Bowen horária no verão foi inferior a 5, enquanto no inverno, alcançou a magnitude de 20.

Pigeon et al. (2008) realizaram medições de fluxos de energia no centro antigo da cidade Toulouse, França, no período de março de 2004 a fevereiro de 2005. Os fluxos médios diários de calor sensível e latente durante o período do verão e inverno alcançaram 86% e 26% do saldo de radiação no período de inverno e -119% e 28% no inverno, o que indica que nesse período o fluxo de calor antropogênico é a maior fonte de energia presente no meio. O calor armazenado dentro do dossel urbano alcançou valor médio diário de 20 W m^{-2} no verão, e 80 W m^{-2} no inverno.

Trabalhos de Balanço de Energia em ambientes urbanos em outras regiões do mundo ainda são escassos, quando comparados com os realizados na Europa e América do Norte. Em se tratando da Ásia, pode-se citar, por exemplo, o trabalho realizado por Das e Padmanabhamurty (2008) que apresentaram dados coletados durante o inverno e verão de 1998 e 1999 em área suburbana ao sul da cidade de Delhi, Índia. O particionamento do saldo de radiação em fluxo de calor sensível e calor latente foram 63% e 16%, respectivamente no verão e 40% e 60% no inverno de 1998. Durante o verão de 1999, os fluxos foram de 52% e 24%, respectivamente durante o verão, e 37% e 39% durante o inverno. O valor da razão de Bowen variou de 0,67 a 0,91 durante o inverno e 2,16 a 3,84 durante o verão.

Moriwaki e Kanda (2004) realizaram medições de fluxos de energia e carbono de maio de 2001 a abril de 2002, na cidade de Tokyo, Japão. Em junho, no

verão, os fluxos energéticos diários de calor sensível, latente e o calor armazenado no dossel urbano alcançaram 49%, 28% e 26% do saldo de radiação, enquanto o valor da razão de Bowen média diária foi de 1,77. Durante o inverno, em dezembro, os valores alcançaram 35%, 11% e 62% do saldo de radiação, e a razão de Bowen ficou em 3,13.

Dou et al. (2009) apresentaram dados de trabalho desenvolvido em Shunyi, Pequim na China no período de julho de 2007 a fevereiro de 2008. Os resultados demonstraram que o particionamento da energia era dominado pelo fluxo de calor latente, no verão, e por fluxo de calor sensível no inverno. Sob condição de céu claro, os fluxos de calor latente, calor sensível e o calor armazenado no dossel urbano foram de 50%, 18% e 32% do saldo de radiação no verão, e de 10%, 56% e 33% do saldo de radiação, no inverno. Além disso, o valor de razão de Bowen média diária foi de 0,53 e 6,29 no verão e no inverno, respectivamente. Segundo os autores, a grande diferença encontrada entre o particionamento dos fluxos de energia entre o sítio suburbano da cidade de Pequim e entre as cidades norte-americanas pode ser atribuída às distintas características da superfície em estudo, tais como o tamanho, forma e arranjos das construções, bem como, a quantidade de cobertura vegetal presente no entorno do sítio estudado.

Apesar do crescente interesse pelo assunto, estudos de Balanço de Energia em áreas urbanas da América do Sul ainda permanecem escassos quando comparados com os estudos realizados em áreas vegetadas como florestas e áreas agrícolas. Pode-se citar no Brasil o trabalho de Barbirato (2008) que estudou por meio de simulação o balanço de energia em alguns pontos para a cidade de Maceió, Alagoas. É possível perceber pela simulação realizada que existe forte relação entre os fluxos de calor armazenado no dossel urbano com o volume de construções presente nas proximidades do local estudado, sendo observado o mesmo comportamento para os fluxos de calor sensível.

Maitelli (2010) apresenta importante contribuição para o estudo de Balanço de Energia na cidade de Cuiabá, Mato Grosso no período de agosto a setembro de 1993. Segundo a autora, a média da razão de Bowen observada foi de 1,02, com valores de até 5,8, o que indicava a predominância do fluxo de calor sensível aquecendo o ar. As taxas de calor estocado foram significativas e chegavam a 22%

da radiação líquida disponível para o sistema. Foi evidenciado que os fluxos de calor sensível predominaram sobre os fluxos de calor latente, e que durante o período diurno, aquele utilizava cerca de 20 a 52% da energia líquida disponível para aquecer o ar. Os fluxos de calor sensível quando somados aos fluxos de calor estocado no tecido urbano consumiu, em média, 62% de radiação líquida disponível para aquecer o sistema urbano.

Em trabalho recente, Ferreira (2010) determinou a variação diurna e sazonal dos principais componentes do balanço de energia na superfície da cidade de São Paulo. Os dados foram coletados durante o ano de 2004 na estação climatológica da Universidade de São Paulo. O fluxo de calor antropogênico foi estimado pelo método de inventário utilizando informações do consumo de combustível, eletricidade e de produção metabólica de calor da população de São Paulo. Em fevereiro, o fluxo de calor armazenado dentro do dossel urbano correspondeu a 9% da radiação líquida, enquanto em agosto, 14,5%, sendo o mesmo estimado pelo método da histerese. Em dezembro, o calor armazenado no dossel urbano correspondeu a 34% do saldo de radiação, enquanto que em junho, o calor armazenado no dossel urbano se tornou negativo, indicando que neste período do ano houve resfriamento do dossel urbano (-3% do valor diário médio mensal de radiação líquida). Durante o período diurno, em fevereiro, os fluxos energéticos de calor sensível, latente e calor armazenado no dossel urbano correspondem a 41%, 13% e 44% respectivamente da energia líquida disponível, enquanto que em agosto, 46%, 14% e 44%. As razões de Bowen média diária determinada em fevereiro e agosto foram de 3,23 e 3,27, respectivamente.

Ao se analisar e comparar os vários estudos de balanço de energia entre os sítios rurais e urbanos, Oke (1988) sintetizou os principais efeitos da urbanização ocasionados pela modificação do uso e ocupação do solo nas cidades:

- a) grande redução do fluxo de calor latente, apesar de que quando há precipitação pluviométrica, este fluxo se torna dominante;
- b) o fluxo de calor armazenado no dossel urbano é superior ao fluxo de calor armazenado no solo em ambientes rurais durante o dia, sendo esta energia liberada durante a noite, o que mantém as superfícies aquecidas durante o período noturno;

c) o fluxo de calor sensível é ligeiramente superior durante o dia e apresenta maior intensidade aproximadamente uma hora depois do pico de radiação solar, permanecendo positivo durante algumas horas após o por do Sol;

d) fluxos de calor sensível positivo podem ser mantidos positivos durante toda a noite; e,

e) o fluxo de calor armazenado no dossel urbano pode alcançar valor máximo antes do pico de radiação solar (aproximadamente uma hora).

Os efeitos físicos descritos acima quando associados àqueles descritos no item 2.1.1 (aprisionamento das onda longas materiais com alta capacidade térmica, fontes de calor antropogênicas etc) são responsáveis pelas diferenças encontradas entre o meio urbano e o rural e desencadeiam o principal fenômeno climático observado e estudado no meio urbano, denominado de Ilha de Calor Urbana, que nada mais é do que um sintoma das modificações ocasionadas no balanço de energia. Os resultados das investigações sobre o comportamento do balanço de energia para diversos sítios foram sintetizados por Piringer et al. (2002) e são apresentados na Tabela 1. Na sequência são descritos todos os componentes do balanço de energia apresentados na Equação 2.

Tabela 1– Variação média diária dos valores máximos dos fluxos de energia nas cidades de clima temperado e subtropical

Parâmetro	Varição ($W m^{-2}$)
Radiação líquida (Q^*)	<400-650
Fluxo de Calor Latente (Q_E)	10-235
Fluxo de Calor Sensível (Q_H)	120-310
Fluxo de Calor armazenado dossel urbano	150-280
Média diária da Razão de Bowen (Q_H/Q_E)	Adimensional
Área Suburbana (residencial)	1,2 – 2,0
Área Industrial	~4,4
Área central da cidade	~9,8

Fonte: Piringer et al. (2002)

2.4.1 Fluxo de Calor Antropogênico (Q_F)

O fluxo de calor antropogênico está associado à liberação de energia dentro do dossel urbano pelo consumo de combustíveis, de eletricidade e devido ao metabolismo desenvolvido pela população urbana. De acordo com Crutzen (2004), a energia total liberada pela atividade humana é relativamente pequena quando comparada com a energia solar. O problema é que essa emissão está concentrada em áreas relativamente pequenas quando comparadas com a área total da superfície terrestre. Assim, dependendo da região onde essa energia é liberada, como no caso das cidades, o calor antropogênico pode ser uma importante contribuição componente no balanço de energia. É importante destacar que o valor médio do calor antropogênico liberado no meio é dependente do uso médio da energia (influenciado pela natureza da economia, pela necessidade de aquecimento das edificações durante o inverno etc) e da densidade populacional da cidade e pode ter uma importante influência no clima urbano, em especial, no fenômeno de Ilha de Calor Urbana que está associado ao aumento da temperatura do ar e redução da umidade nas cidades. Outro aspecto a ser destacado é que a liberação do fluxo de calor antropogênico tem importante contribuição no período noturno, onde, em algumas cidades, ele pode ser igual ou superior ao saldo de radiação, o que contribui para a redução da estabilidade estática da Camada Limite Urbana, intensificando a Ilha de Calor Urbana e favorecendo a dispersão de poluentes no período noturno (OKE, 1988).

A principal dificuldade de se calcular o fluxo de calor antropogênico é obter todas as informações necessárias para estimar a energia dissipada (SAILOR E LU, 2004). A técnica mais simplificada é adotar valores constantes no tempo e no espaço para o calor antropogênico (ARNFIELD, 1998). Outra abordagem bastante utilizada é a estimativa a partir do balanço de energia, onde os fluxos de calor sensível e latente são calculados através de observações meteorológicas e o fluxo de calor armazenado no dossel urbano é simulado a partir de técnicas de modelagem (GRIMMOND et al., 1991), enquanto o fluxo de calor antropogênico é obtido a partir do resíduo, isolando o termo Q_F na equação do balanço de energia da superfície e desprezando a advecção horizontal (FERREIRA, 2010; OFFERLE et al., 2005). Essa técnica é denominada de Método do Resíduo. A terceira e mais utilizada, é a técnica denominada de Método do Inventário de Energia, onde informações do

consumo de energia primária utilizada pelos veículos, residências, indústrias e estabelecimentos comerciais, contribuição de energia associada ao metabolismo humano e animal são necessárias para estimativa do calor antropogênico. A estimativa da energia dissipada no dossel urbano é feita pela composição dos consumos de combustíveis, eletricidade e energia dissipada pelo metabolismo humano. A principal hipótese adotada é que todo o calor liberado pelo consumo de combustível e eletricidade é dissipado dentro do dossel urbano e em um intervalo de tempo pequeno (SAILOR e LU, 2004). Este último método é o que foi utilizado nesse trabalho para estimativa do calor antropogênico.

É possível obter valores médios do calor antropogênico liberado em várias áreas urbanas em diferentes países (OKE, 1987, p. 276). No trabalho apresentado por Sailor e Lu (2004), os fluxos de calor antropogênicos foram estimados para quatro cidades Norte-Americanas: Atlanta, com valores de pico durante o verão e inverno de 15 W m^{-2} , Chicago, São Francisco e Filadélfia, com valores de pico de $30\text{-}60 \text{ W m}^{-2}$ durante o verão e de $70\text{-}75 \text{ W m}^{-2}$ no inverno. Dando sequência ao seu trabalho, Sailor e Hart (2006) aplicaram o método do inventário para 61 cidades Norte-Americanas para as estações de verão e inverno. Entre as cidades apresentadas no estudo, tem-se o interesse especial na cidade de Miami, Flórida, que apresenta características climáticas semelhantes aos sítios urbanos estudados neste trabalho. Para esta cidade, o valor de pico do fluxo antropogênico alcançou $28,5 \text{ W m}^{-2}$ durante o verão e de $25,5 \text{ W m}^{-2}$ no inverno. Em estudo inédito no Brasil, Ferreira (2010) estimou a contribuição do fluxo de calor antropogênico na cidade de São Paulo. Fazendo uso do método do inventário, encontrou no verão o valor de pico de $18,6 \text{ W m}^{-2}$ e no inverno, $19,1 \text{ W m}^{-2}$.

Tendo por base o Método do Inventário proposto por Sailor e Lu (2004), o calor introduzido no meio pelo homem, denominado de Antropogênico, pode ser dividido em três componentes que representam as maiores fontes de calor no meio urbano representado pela equação:

$$Q_F = Q_{FV} + Q_{FS} + Q_F \quad \text{Equação 3}$$

em que Q_{FV} é o fluxo de calor antropogênico gerado pelas fontes veiculares, Q_{FS} é o fluxo de calor gerado pelas fontes estacionárias (consumo de eletricidade e

combustível por residências, indústrias e estabelecimentos comerciais) e Q_{FM} é o fluxo de calor gerado pelo metabolismo humano e/ ou animal.

2.4.1.1 Fluxo de Calor Antropogênico liberado pelas Fontes Veiculares (Q_{FV})

A equação proposta por Sailor e Lu (2004) para estimar a variação do calor antropogênico liberado pelas fontes veiculares (Q_{FV}) é dada pela seguinte equação:

$$Q_{FV} = pcDVD \cdot \rho_{pop}(h) \cdot Ft(h) \cdot EV \quad \text{Equação 4}$$

em que $pcDVD$ é a distância média percorrida pelos veículos por pessoa dia em $\text{km pessoa}^{-1}\text{dia}^{-1}$, $Ft(h)$ é a fração de tráfego em uma hora (fração trafego/h), $\rho_{pop}(h)$ é a densidade de população em uma hora (hab/h), EV é a energia liberada pela queima de combustíveis pelos veículos pela distância percorrida (normalmente por metro percorrido, em J/m).

Como durante o dia circulam veículos que utilizam diferentes tipos de combustíveis, torna-se necessário fazer a composição da energia liberada pela queima de combustível por estes veículos. A energia liberada pela queima de combustíveis pelos veículos (EV_{Comb}) considerando a fração de veículos que utiliza gasolina, álcool hidratado e óleo diesel pode ser avaliada pela equação:

$$EV = \sum a_{comb} EV_{comb} \quad \text{Equação 5}$$

em que a_{comb} a fração de veículos circulando em cada hora e EV_{comb} que representa a energia liberada pelos veículos em função da distância percorrida e pelo tipo de combustível utilizado (EV_{comb}). O último termo pode ser estimado utilizando a equação:

$$EV_{comb} = (NHC_{comb} \cdot \rho_{comb}) / FE \quad \text{Equação 6}$$

em que NHC_{comb} é o calor líquido liberado pela queima do combustível (álcool, gasolina ou diesel, em J/l), ρ_{comb} é a densidade do combustível utilizado e FE é a economia de combustível (consumo médio urbano, km/l ou m/l).

A Equação 4 é dependente da densidade de população horária, sendo que a mesma pode variar durante o dia. Em muitas áreas urbanas, a densidade populacional no centro urbano aumenta substancialmente durante a jornada de trabalho devido ao

deslocamento dos trabalhadores e as pessoas que visitam a cidade durante o dia. Para levar em consideração este fato, Fulton (1984) propôs a seguinte equação para estimar a densidade da população horária:

$$\rho_{pop}(h) = (NWRP + WP)/A \quad \text{Equação 7}$$

sendo $NWRP$ (non-working resident population) o número de pessoas residentes na cidade, obtida a partir da contagem populacional realizada no Censo, WP (working population) é o número de pessoas que não residem na cidade núcleo, ou seja, pessoas que moram fora do núcleo urbano mas que se deslocam para a cidade núcleo principalmente durante a semana a trabalho ou a estudo. No Brasil, WP é chamado de movimento pendular da população.

2.4.1.2 Fluxo de Calor Antropogênico liberado pelas Fontes Estacionárias (Q_{FS})

O calor liberado pelas fontes estacionárias (eletricidade, gás natural, GLP e óleo combustível) pode ser estimado através da seguinte equação proposta por Sailor e Lu (2004):

$$Q_{FS} = Q_{FSE} + Q_{FSF} \quad \text{Equação 8}$$

em que Q_{FSE} é o fluxo de calor antropogênico liberado pelo consumo de eletricidade e Q_{FSF} é o fluxo de calor liberado pelas fontes estacionárias. A dissipação desta energia é verificada principalmente nas residências, estabelecimentos comerciais e industriais.

a) Consumo de Eletricidade pelas Fontes Estacionárias (Q_{FSE})

Sailor e Lu (2004) propõem a seguinte equação para estimar a variação diurna do fluxo de calor antropogênico liberado pelo consumo de eletricidade:

$$Q_{FSE} = E_{DPC} \cdot f(h), \quad f(h) = \sum_1^24 f(h) = 1 \quad \text{Equação 9}$$

em que E_{DPC} é fluxo de energia liberado devido ao consumo diário de eletricidade pelas fontes estacionárias e $f(h)$ é a fração horária do consumo diário de eletricidade pelas fontes estacionárias. Como na grande maioria das vezes os dados de consumo estão disponibilizados na forma de consumo mensal, Sailor e Lu (2004) sugerem a

utilização de uma equação alternativa para estimar do calor liberado pelo consumo de eletricidade:

$$E_{DPC} = (NHC_{electr} \cdot C_{electr}) / (n_d \cdot A) \quad \text{Equação 10}$$

em que NHC_{electr} é a energia liberada devido consumo de eletricidade, C_{electr} é o consumo mensal de eletricidade pelas fontes estacionárias, n_d é o número de dias do mês e A é a área urbanizada onde a energia está sendo dissipada.

b) Consumo de combustíveis pelas fontes estacionárias (Q_{FSF})

A dissipação de energia pelo consumo de combustíveis fósseis pelas fontes estacionárias é estimada, de forma análoga ao consumo de eletricidade, através do fluxo de energia liberado no consumo diário de combustíveis pelas fontes estacionárias:

$$Q_{FSF} = F_{DPC} \cdot g(h) \quad \text{Equação 11}$$

em que F_{DPC} é o fluxo de energia liberado pelo consumo diário de combustíveis e $g(h)$ é a fração horária do consumo diário de combustíveis pelas fontes estacionárias. A dissipação de energia pelo consumo de combustíveis está relacionada ao uso do gás natural, GLP e óleo combustível.

Seguindo Sailor e Lu (2004), o fluxo de energia liberado pelo consumo diário de cada tipo de combustível pelas fontes estacionárias (F_{DPC}) pode ser estimado utilizando a equação:

$$F_{DPC} = [\Sigma(NHC_{comb} \cdot \rho_{comb} \cdot C_{comb})] / (n_d \cdot A) \quad \text{Equação 12}$$

em que NHC_{Comb} é o calor líquido liberado pelo consumo de combustíveis pelas fontes estacionárias, C_{Comb} é o consumo mensal de combustíveis e n_d é o número de dias no mês e A é a área urbanizada onde a energia está sendo dissipada.

2.4.1.3 Fluxo de Calor Antropogênico liberado pelo Metabolismo Humano (Q_{FM})

A componente final do calor antropogênico é devido a energia liberada pelo metabolismo humano e animal. No caso de áreas urbanizadas, o ser humano representa a principal fonte, sendo assim, a contribuição dos animais normalmente desprezada. As taxas metabólicas não são constantes durante o dia e dependem da

atividade que a pessoa está desempenhando. Quando se encontra dormindo, a energia dissipada pelo corpo de uma pessoa de 70 kg é de aproximadamente 75W. Sentado (descansando), a taxa metabólica aumenta para 115W, enquanto que em algumas atividades que requerem maior esforço físico, esta taxa pode alcançar 300W (FANGER, 1972).

A variação diária do fluxo de calor antropogênico associado ao metabolismo humano (Q_{FM}) pode ser estimada pelo produto da taxa metabólica desempenhada pela densidade de população presente em uma determinada área do bairro ou cidade pela equação:

$$Q_{FM} = M \cdot \rho_{pop} \quad \text{Equação 13}$$

em que M é a taxa metabólica desempenhada pela pessoa e ρ_{pop} é a densidade de população presente em uma determinada área, bairro ou cidade.

2.4.2 Fluxo de Calor Armazenado Dentro Dossel Urbano (ΔQ_S)

Em superfícies bem definidas e homogêneas que não sofrem grandes variações espaciais, a avaliação do calor armazenado no solo é relativamente simples como acontece em áreas com solos desnudos ou em zonas agrícolas. Nesses casos, admite-se que o solo tem comportamento ideal, como um sólido inerte, poroso, homogêneo e isotrópico. No entanto, em ambientes urbanos, devido à natureza tridimensional das superfícies e da diversidade de tipos de materiais presentes nesse meio, essas hipóteses não podem ser adotadas e a avaliação de ΔQ_S se torna complexa e de difícil mensuração. Assim, para o entendimento desse fenômeno, torna-se necessário definir o que venha ser fluxo de calor armazenado no dossel urbano e onde ele acontece. De acordo com Roberts et al. (2006), o fluxo de calor armazenado no dossel urbano é a energia absorvida ou liberada (por unidade de área e tempo) devido as trocas de calor sensível que ocorrem no ar, nos edifícios, na vegetação e no solo presente dentro do complexo dossel urbano. Essas trocas acontecem por condução e convecção no interior de um volume de controle localizado na escala espacial de interesse, que se estende desde o topo da subcamada rugosa (um pouco acima do nível dos telhados) até a parte inferior do dossel urbano (substrato), onde o fluxo de calor é considerado igual a zero.

A intensidade do fluxo de calor no dossel urbano depende da natureza e estrutura do meio urbano, propriedades térmicas dos materiais que o compõem, em especial a condutividade e capacidade térmica, e do acoplamento existente entre o dossel urbano, as superfícies que o compõem e a atmosfera. Piringer et al. (2002) destacam que ΔQ_s é um termo significativo no balanço de energia de superfícies urbanas, e consideravelmente maior do que para a maioria dos sistemas naturais, com exceção da água, atingindo valores que variam de 150 W m^{-2} a 300 W m^{-2} , o que pode corresponder a até 50% do valor de Q^* diário em áreas centrais da cidade. O ΔQ_s é um termo importante no balanço de energia e utilizado na avaliação do desempenho térmico dos edifícios, na avaliação do conforto para os pedestres, na modelagem de fluxo convectivo de calor sensível, na avaliação do crescimento da camada limite, nos estudos de Ilha de Calor etc (ROTH e OKE, 1994).

Ferreira (2010) destaca que a capacidade de armazenamento do dossel urbano pode ser caracterizada pela propriedade denominada admitância térmica, que informa o qual rápido uma superfície irá receber ou ceder calor. É definida como a raiz quadrada do produto da condutibilidade térmica pelo calor específico. Oke (1982) relata que a admitância térmica é uma propriedade física da superfície que indica a amplitude e a velocidade da resposta térmica à entrada de energia dentro do sistema (no caso o rural ou o urbano). Em geral, os materiais que compõem o meio urbano (concreto, asfalto, paredes, telhas entre outros) apresentam maior admitância térmica que os materiais que compõem as superfícies não urbanizadas (solo nu, gramas, arbustos, árvores de médio e grande porte) o que faz com que a energia armazenada dentro do dossel urbano seja maior do que nos ambientes rurais. A admitância e a inércia térmica são frequentemente consideradas como os termos-chave na gênese da Ilha de Calor Urbana (GRIMMOND et al., 1991).

Os métodos de medições diretas do fluxo de calor no solo em ambientes convencionais (solo nu, plantações e florestas) através de fluxímetros (placas de fluxos de calor instaladas dentro do solo) não são facilmente adaptáveis ao sistema urbano devido à complexidade de elementos superficiais que o compõem. Conforme destacam Roberts et al. (2006), algumas tentativas de avaliação de ΔQ_s em áreas urbanas foram realizadas mas ficaram restritas a análises de superfícies como o asfalto, concreto e coberturas diversas. Para suprir essas dificuldades, alguns

métodos indiretos foram desenvolvidos para estimar o fluxo de calor armazenado no dossel urbano. São eles:

a) Método do Resíduo (Energy Balance Residual Method – RES) – Neste método, ΔQ_S é avaliado a partir do resíduo das observações diretas da radiação líquida (Q^*), do fluxo de calor sensível (Q_H), do fluxo de calor latente (Q_E), utilizando-se a seguinte equação:

$$\Delta Q_S = (Q^* + Q_F) - (Q_H + Q_E) \quad \text{Equação 14}$$

sendo estes termos já definidos na Equação 2. Apesar de ser um método relativamente simples, sua principal desvantagem é o acúmulo de erros decorrentes de imprecisão das medições, acrescidos da variabilidade espacial dos reais valores dos termos do balanço energia da superfície em estudo. Como demonstrado por Wilson (2002), o fechamento do balanço de energia é difícil de ser conseguido, mesmo utilizando os melhores equipamentos e métodos. As estimativas de ΔQ_S a partir do método residual inevitavelmente incluem o calor antropogênico liberado no meio, bem como o transporte advectivo horizontal de calor e umidade (ΔQ_A) dentro do volume de controle definido na Figura 3;

b) Modelagem numérica – Os modelos numéricos de dossel urbano (MDUSs) acoplados a modelos de mesoescala são capazes de simular os fluxos turbulentos no topo da camada mais baixa da atmosfera, a UCL (acima do dossel urbano). A modelagem numérica usa a geometria local dos cânions urbanos para simular os efeitos radioativos, térmicos, de umidade e do vento produzido pela presença dos edifícios e avenidas, obtendo como resposta as trocas de calor e umidade nesses ambientes. As fontes antrópicas de liberação de calor e umidade pelos edifícios, carros, fontes térmicas também podem ser adicionadas no modelo. O fluxo de calor armazenado no dossel urbano é obtido pela solução numérica através equação do fluxo de calor no volume de controle idealizado para o dossel urbano na modelagem;

c) Esquema de Massa Térmica (Thermal Mass Scheme - TMS) – A estimativa do calor armazenado no dossel urbano também pode ser derivada dos conceitos básicos da condução de calor e do calor volumétrico armazenado dentro dos materiais. O modelo “struktur” proposto por Peikorz (1987) foi desenvolvido levando em consideração a temperatura interna e externa das superfícies que

compõem o dossel urbano, bem como informações de propriedades térmicas e geométricas das construções inseridas dentro do volume de controle. A avaliação de ΔQ_S é feita a partir da seguinte equação proposta pelo autor:

$$\Delta Q_S = \sum_{i=1}^n \Delta Q_{Si} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{A_i} \int C_i \frac{\Delta T}{\Delta t} dV_i \quad \text{Equação 15}$$

em que o índice i define o número de superfícies dentro do volume de controle, A_i a área da superfície de cada componente i do sistema, C_i é a capacidade térmica de cada componente dos materiais i , $\Delta T/\Delta t$ é a taxa de mudança de temperatura que acontece em cada componente i dentro volume de controle por intervalo de tempo e dV_i é o volume de cada componente i . A Equação 14 descreve a variação do calor armazenado no topo do dossel urbano resultado dos fluxos condutivos de cada componente interno dentro do volume de controle. Para se poder aplicar o esquema proposto por Peikorz (1987) no sistema urbano, é necessário o conhecimento dos volumes dos edifícios, dos tipos de superfícies, sua orientação e massa dentro da área de contribuição, bem como a temperatura interior e exterior dos edifícios para que possa ser feita a taxa média de avaliação da temperatura dos componentes do sistema por intervalo de tempo ($\Delta T/\Delta t$). A contribuição da massa de ar e da vegetação são consideradas pequenas quando comparadas com as contribuições das massas dos componentes sólidos (KERSCHGENS e HACKER, 1985); e,

d) Modelos Empíricos baseados em parametrizações empíricas – Uma parametrização bastante utilizada para calcular ΔQ_S é feita a partir da energia disponível no meio (Q^*) e das características dos materiais presentes no meio urbano em estudo. Uma das primeiras tentativas de se parametrizar ΔQ_S foi proposta por Oke et al. (1981) e considerava que o fluxo de calor no dossel urbano era linearmente proporcional ao saldo de radiação disponível multiplicado pela proporções dos tipos de materiais presentes no meio urbano em estudo:

$$\Delta Q_S = \alpha_i (a_i Q^* + b_i) \quad \text{Equação 16}$$

em que α_i é a fração de área urbana coberta por cada tipo de superfície i , Q^* é o saldo de radiação na superfície e a_i é a relação direta entre a energia disponível no meio e o calor armazenado para cada tipo de material i e b_i é o deslocamento da origem para cada tipo de material i . O resultado obtido pelo modelo empírico linear foi

satisfatório, quando utilizado para períodos de um ou mais dias. Entretanto, observou-se que o mesmo não conseguia prever com exatidão os valores horários para todas as medições, visto que o modelo linear não permitia ajustar a defasagem existente entre ΔQ_s e Q^* em muitos horários do dia. Camuffo e Bernardi (1982) reconheceram explicitamente este comportamento e propuseram a seguinte equação para avaliar o termo de energia armazenado em superfícies naturais:

$$\Delta Q_s = a_1 Q^* + a_2 \frac{\partial Q^*}{\partial t} + a_3 \quad \text{Equação 17}$$

em que, t é o tempo, a_1 indica a dependência existente entre o calor armazenado no dossel e o saldo de radiação na superfície (adimensional), a_2 é a amplitude da histerese (em horas) e a_3 é a interceptação da relação no eixo y em $W\ m^{-2}$. Valores positivos de a_2 indicam que o pico no fluxo de calor no solo ou no dossel antecede o pico do saldo de radiação na superfície; valor igual a zero indica que o fluxo de calor no solo ou no dossel estão em fase, ou seja, não há histerese. Valores negativos indicam que o pico no fluxo de calor no solo ou no dossel acontecem posteriormente ao pico no saldo de radiação.

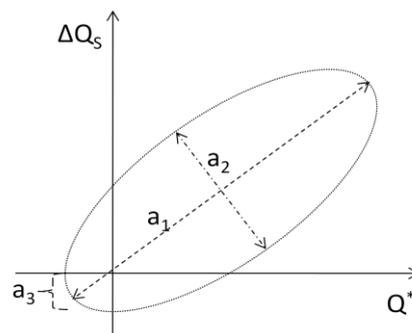


Figura 5 – Coeficientes da regressão proposta por Camuffo-Bernardi para descrição de ΔQ_s (ou Q_G para superfícies planas) em função de Q^* . a_1 é a inclinação da curva, a_2 a largura da histerese e a_3 é a interceptação da curva no eixo y (ΔQ_s)

Fonte: Meyn e Oke (2009)

Grimmond e Oke (1998) verificaram em cidades de clima temperado que o máximo valor no fluxo condutivo dentro do dossel urbano antecede o saldo de radiação em aproximadamente em 1 hora. Os coeficientes da equação de Camuffo e Bernardi (1982) são obtidos a partir de regressão entre os dados observados em campo com os valores fornecidos pela Equação 17. Estes três coeficientes e suas relações com ΔQ_s (Q_G) e Q^* são ilustrados na Figura 5. Oke e Cleugh (1987) demonstraram que o formato da equação 16 é apropriado para estimar ΔQ_s .

Grimmond et al. (1991) aperfeiçoaram o modelo de histerese inicialmente proposto por Oke e Cleugh (1987), e apresentaram o Modelo Objetivo de Histerese (Objective Hysteresis Model - OHM) para estimar o calor armazenado no dossel urbano. O modelo, além de ΔQ_s ser função do saldo de radiação disponível na superfície, é dependente das propriedades da superfície do sítio em estudo. Assim, é possível descrever a relação não linear (a histerese) entre as forças radioativas e entre a energia armazenada dentro do dossel urbano através da seguinte equação:

$$\Delta Q_s = \sum_1^n (f_i a_{1i}) Q^* + \sum_1^n (f_i a_{2i}) \frac{\partial Q^*}{\partial t} + \sum_1^n (f_i a_{3i}) \quad \text{Equação 18}$$

em que ΔQ_s é o fluxo de calor armazenado dentro do dossel urbano, Q^* é o saldo de radiação líquida na superfície urbana em estudo, $\partial Q^*/\partial t$ é a taxa de variação da radiação líquida no tempo, a_{1i} , a_{2i} e a_{3i} são coeficientes empíricos para cada tipo de superfície i (asfalto, concreto, paredes, telhados, vegetação, solo exposto) associados à resposta térmica da superfície em relação a intensidade do fluxo de energia de entrada, e f_i são as frações das áreas das superfícies i dentro da área pesquisada.

Para aplicar o esquema proposto existe a necessidade de se conhecer a priori o saldo de radiação líquido no sítio, bem como, realizar um inventário das características superficiais da área (materiais presentes, altura das edificações, morfologia da área e dos edifícios, frações de área impermeabilizadas, vegetadas e de cânions urbanos). As frações de áreas das superfícies (f_i) normalmente são avaliadas através de fotografias aéreas ou de satélite das áreas do entorno, bem como através de levantamentos de campo (GRIMMOND e SOUCH, 1994).

As características da superfície são calculadas nas áreas dos sítios estudados, sendo que estas variam de tamanho e forma no entorno de cada local de medição, isto porque, os sensores “vêm” apenas uma parcela do seu entorno imediato. As áreas de contribuição ou “footprints” para os locais onde estão posicionados os sensores podem ser avaliadas por modelos simplificados, denominados de estáticos, ou mais complexos, denominados de dinâmicos. Nos modelos estáticos, as áreas de contribuição das superfícies (áreas impermeáveis de concreto e asfalto, vegetadas, área construída composta por telhados e cânions urbanos) são avaliadas dentro de círculos estáticos no entorno do sítio pesquisado. Oke (2006) destaca que, como regra geral, os sensores de temperatura ou umidade apresentam um círculo de

influência de aproximadamente 500m de raio. Nos modelos dinâmicos, as áreas de contribuição são dependentes da direção do vento a barlavento, das condições meteorológicas e do sistema de medição dos fluxos instalados no sítio (GRIMMOND et al., 1991). Por este motivo, as áreas de contribuição variam consideravelmente no tempo e no espaço ao longo do dia, principalmente devido às condições de estabilidade da atmosfera e da direção do vento.

Conforme destaca Oke (2006), a área de contribuição de um sensor, que deriva o seu sinal via transporte turbulento, não está simetricamente distribuída em relação à posição do mesmo. Ela apresenta um formato elíptico e está alinhada a barlavento em relação ao posicionamento dos instrumentos de medição e alinhada ao longo da direção do vento predominante (Figura 6). O tamanho longitudinal (e) e lateral (d) da área elíptica de contribuição (footprint) é dependente das características do fluxo e do desenvolvimento da Camada Limite Atmosférica entre a superfície e o sensor. Devido à necessidade de se interpretar os sinais registrados pelos sensores em campo em áreas heterogêneas, principalmente no meio urbano, uma série de estudos tem abordado a relação entre a distribuição espacial das fontes de superfície e o sinal medido pelo sensor que está posicionado uma determinada altura dentro camada superficial (HORST e WEIL, 1992; HORST e WEIL, 1994; SCHMID, 1994; SCHMID, 1997; SCHMID, 2002; FOKEN e LECLERC, 2004).

Entre os vários modelos utilizados para avaliar a área de contribuição para concentrações (como por exemplo, temperatura e umidade do ar) e fluxos, destaca-se o modelo SAM apresentado por Schmid (1994) na qual a área de contribuição para os sensores é avaliada pelo Modelo de Pluma, sendo baseado na teoria-K e na solução analítica da equação de advecção-difusão proposta por Van Ulden (1978). Este modelo requer como parâmetros de entrada a altura de referência de instalação dos sensores em campo (z_m), a rugosidade do sítio dado pelo deslocamento do plano zero (z_0), comprimento de estabilidade de Monin-Obukhov (L), a velocidade de atrito (u^*), desvio da direção do vento (σ_v) e velocidade média do vento (u_m) no intervalo de medição considerado. Na definição da área de contribuição do sinal registrado pelos sensores (A_{pl}) é utilizada uma função peso da fonte (f_p) que fornece informações sobre os pesos relativos das fontes pontuais individuais localizadas na superfície a barlavento do sensor. Para isso, assume-se que a superfície a barlavento

é composta por uma variedade de fontes pontuais com características diferentes. A área de contribuição (Ω_P ou A_{pl}) é equivalente ao volume sob a função peso da fonte, limitada pelo isopleta f_p e a superfície do cilindro abaixo dela (Figura 6). Nota-se que há baixa probabilidade de um sensor receber contribuição de uma superfície que se encontra próximo a ele. A probabilidade aumenta para superfícies mais afastadas até um valor máximo (x_m, f_{max}) e novamente diminui, visto que as contribuições geradas por superfícies muito afastadas apresentam baixa probabilidade de alcançar os sensores. Os parâmetros a (distância mínima de contribuição), e (distância máxima de contribuição) e d (distância lateral máxima de contribuição) descrevem a área de uma elipse a barlavento da posição dos sensores. O modelo admite turbulência horizontal homogênea paralela à direção do vento, contrária a direção do eixo x .

Não há um modelo padrão aceito para determinação do fluxo de calor armazenado no dossel urbano, visto que ainda não há nenhum instrumento ou técnica disponível que forneça os corretos valores de ΔQ_S para os quais possa ser feita a calibração dos métodos descritos. Além disso, ainda não é possível avaliar os erros significativos entre os métodos. Assim sendo, cada um dos métodos apresentados são passíveis de erros tais como de instrumentação, de imperfeições metodológicas, de amostragem adequada, de ineficiência ou excesso de simplificação nas parametrizações, da aplicação dos coeficientes avaliados em algumas áreas para outras e de limitações numéricas pelo método proposto (ROBERTS et al, 2006).

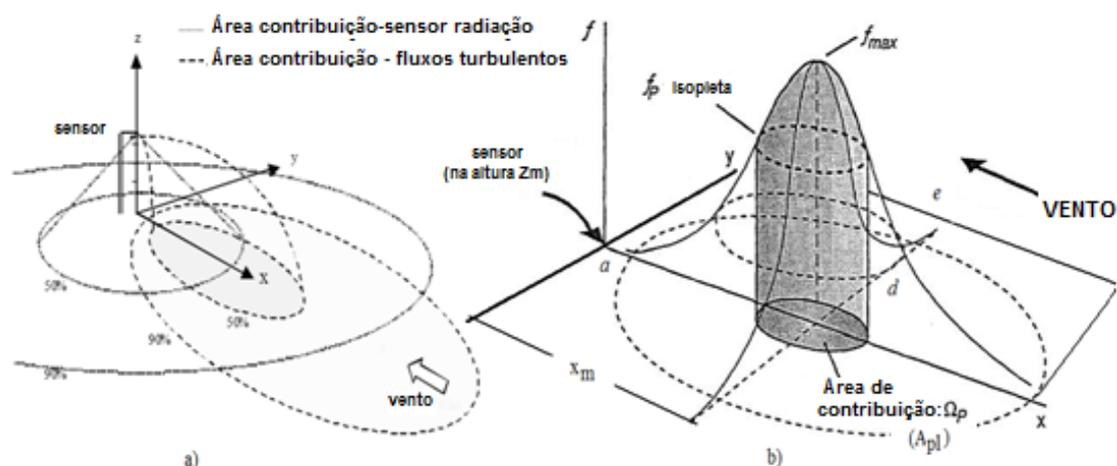


Figura 6 – a) Representação conceitual das áreas de contribuição (“footprints”) para os sensores de radiação (círculo pontilhado), concentrações escalares (temperatura e umidade) e fluxos turbulentos (elipse tracejada). b) Representação esquemática da área de contribuição para um sensor posicionado a uma altura z_m

Fonte: a) Oke (2006) e b) Schmid (1994)

2.4.3 Fluxo de Calor Sensível e Latente (Q_H e Q_E)

O fluxo de uma propriedade não especificada pode ser definido como sendo a quantidade da grandeza considerada que atravessa uma determinada superfície por unidade de tempo. Caso esta propriedade venha a ser transportada verticalmente da superfície do solo para o ar na forma de momento, calor e de vapor d'água, estes fluxos passam a ser denominados de momento, calor sensível e latente e podem ser expressos pelas seguintes equações:

$$\tau = -\rho K_M \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad \text{Equação 19}$$

$$Q_H = -\rho c_p K_H \frac{\partial T}{\partial z} \quad \text{Equação 20}$$

$$Q_E = -\rho \lambda K_E \frac{\partial q}{\partial z} \quad \text{Equação 21}$$

em que ρ é a densidade do ar, c_p é o calor específico da água a pressão constante, λ é o calor latente de evaporação, $\partial \bar{u} / \partial z$, $\partial T / \partial z$ e $\partial q / \partial z$ são os gradientes verticais de velocidade média do vento, da temperatura e da umidade específica. Nas equações 19, 20 e 21, os coeficientes de transferência molecular foram substituídos pelos coeficientes K_M , K_H e K_E para expressar que os fluxos estão sendo avaliados em condições de difusão turbulenta. Assim, K_M representa o coeficiente de transporte turbulento, K_H o coeficiente de difusividade térmica para o ar e K_E o coeficiente de transferência turbulenta para o vapor d'água e são derivados a partir do coeficiente Austausch (SCHMIDT, 1925), dado pelo produto do coeficiente de difusão pela densidade do ar ($A = \rho K$).

Alguns métodos micrometeorológicos podem ser utilizados para estimar os fluxos turbulentos de momento, calor sensível e latente. No método de covariância dos vórtices turbulentos (“eddy covariance”), os fluxos são obtidos diretamente por meio da correlação das flutuações da temperatura do ar ou umidade específica com as flutuações da velocidade vertical do vento, através das equações (OKE, 1987; FOKEN, 2008):

$$\tau = -\rho \langle u' w' \rangle \quad \text{Equação 22}$$

$$Q_H = -c_p \rho \langle T' w' \rangle \quad \text{Equação 23}$$

$$Q_E = -\lambda \rho \langle q' w' \rangle \quad \text{Equação 24}$$

em que ρ é a densidade do ar, c_p é o calor específico do ar à pressão constante, λ é o calor latente de evaporação da água, τ é o fluxo de momento, Q_H e Q_E os fluxos de calor sensível e latente, u' , w' são as flutuações turbulentas das componentes horizontal e vertical do vetor velocidade de ar, T' é a flutuação da temperatura do ar e q' é a flutuação da umidade específica do ar, sendo que $\langle \rangle$ representa uma média no tempo que seja representativa da esperança estatística da população.

Os métodos da razão de Bowen – BREB (Bowen, 1926), Aerodinâmico – AERO (THORNTHWAITE e HOLZMAN, 1939) e o das Resistências (BERKOWICZ e PRAHM, 1982) são derivados dos gradientes de entidades medidas (temperatura, concentração de vapor d'água, velocidade do vento) e de relações conhecidas entre os fluxos que estão sendo estimados, sendo obtidos através da utilização de instrumentos micrometeorológicos convenientemente instalados em uma torre vertical em dois ou mais níveis distintos nas áreas em estudo. Biudes (2008) destaca que estes métodos se baseiam em equações de conservação de estado, na qual o tempo de mudança de uma propriedade, no caso a temperatura e concentração do vapor d'água, são balanceados pela média horizontal e a advecção vertical. Desta forma, é assumido que a transferência de calor e massa ocorre na posição vertical, desprezando-se o transporte horizontal (advecção horizontal - ΔQ_A), conforme apresentado na Equação 2. Outro aspecto importante a ser considerado nesses métodos é que o princípio da similaridade de Monin-Obukhov (MO) dentro da CLS (camada limite superficial) deve ser válido, o que implica em estabelecer equivalências entre os diferentes coeficientes de difusão turbulenta na CLS ($K_M \cong K_H \cong K_E$). No presente trabalho, adotou-se o Método da Razão de Bowen para estimativas dos fluxos energéticos nos sítios urbanos, e por isso, apresenta-se no item 2.4.3.1 descrição mais elaborada sobre este método. Caso seja interesse, os outros métodos podem ser consultados com maior profundidade em Foken (2008).

2.4.3.1 Método da Razão de Bowen

O Bowen Ratio-Energy Method (BREB) se baseia na lei de conservação de energia no sistema Solo-Ar-Atmosfera. A ideia utilizada no método para estimar os fluxos convectivos se baseia no fato de que a energia disponível na superfície ($Q^* - Q_G$ ou $Q^* + Q_F - \Delta Q_S$, para o caso de áreas urbanas) possa ser repartida entre os fluxos de calor sensível e latente através do que se denominou Razão de Bowen ($\beta = Q_H/Q_E$) em homenagem ao pesquisador que inicialmente fez a proposição do método. A teoria de similaridade de Monin-Obukhov estabelece que dentro da camada limite os fluxos são homogêneos, o que permite escrever que $K_H/K_E = \phi_H/\phi_E$, sendo que ϕ_H e ϕ_E representam as funções universais de similaridade para os perfis de temperatura e umidade específica dentro da CLS (FOLKEN, 2006). Experimentalmente, sabe-se que ϕ_H é igual a ϕ_E em todos os regimes de estabilidade da atmosfera, o que implica dizer que K_H e K_E são similares. Ao se admitir esse comportamento, é possível definir a Razão de Bowen como sendo a relação entre o fluxo de calor sensível e latente, sendo a mesma expressa através da seguinte equação:

$$\beta = \frac{Q_H}{Q_E} = \frac{K_H c_p \Delta T}{K_E \lambda \Delta q} = \frac{c_p \Delta T}{\lambda \Delta q} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad \text{Equação 25}$$

em que ΔT e Δe se referem a diferença de temperatura e pressão de vapor d'água entre dois níveis verticais de medição junto à superfície, $\gamma = c_p p / \epsilon L_v$ a constante psicrométrica, p a pressão atmosférica, ϵ a razão entre os pesos moleculares do vapor d'água e do ar (0,622), e L_v o calor latente de vaporização da água, sendo os demais termos já foram definidos nas equações 19, 20 e 21.

Cabe aqui destacar que este método somente se aplica sob as seguintes restrições (FOLKEN, 2008):

a) em condições de estado de equilíbrio, ou seja, não pode haver nenhuma alteração acentuada na radiação ou nos campos de velocidade durante o período das observações;

b) os fluxos devem se manter constantes com a altura e isso implica que não pode haver divergência ou convergência vertical de fluxos; e,

c) que exista similaridade entre o coeficiente de difusividade térmica e o coeficiente de transferência turbulenta para o vapor d'água ($K_H \cong K_E$), mas não

necessariamente para o coeficiente de difusividade turbulenta de momento (K_M), o que torna o método não dependente das condições de estabilidade da atmosfera, diferentemente do que acontece com o método aerodinâmico.

Para a aplicação do método, torna-se necessário estabelecer uma convenção para os sinais dos fluxos de energia que estão sendo estimados. Desta forma, quando a radiação líquida (Q^*) está direcionada para baixo (entrada de radiação no sistema), ela é admitida ser positiva. Quando ΔQ_s é conduzido para dentro do dossel urbano, ele também é considerado positivo (Figura 7). Os fluxos de calor sensível e latente são positivos para cima, com direção oposta à dos gradientes de temperatura ($\partial T/\partial z$) < 0 e da pressão de vapor d'água ($\partial e/\partial z$) < 0 (Equações 19, 20 e 21). Para seguir a convenção apresentada na Figura 7, tanto ΔT quanto Δe devem ser medidos a partir da diferença entre o nível inferior e superior, pois assim, tanto os sinais dos fluxos de calor sensível (Q_H) ou de calor latente (Q_E) são positivos quanto a diferença de temperatura (ΔT) e de pressão de vapor d'água (Δe) também o são.

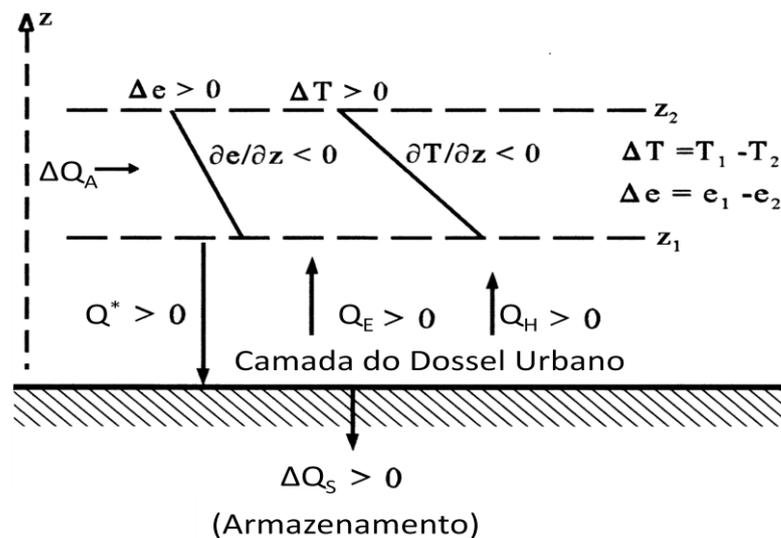


Figura 7 – Representação dos fluxos de energia na interface entre o ar e a superfície mostrando a convenção de sinais adotada na estimativa dos fluxos. ΔQ_A representa fluxo adveção horizontal (normalmente desprezado), Q^* a radiação líquida, Q_H fluxo de calor sensível, Q_E fluxo de calor latente, ΔQ_s fluxo de calor armazenado no dossel urbano, ΔT e Δe são a diferença da temperatura e pressão de vapor d'água entre os dois níveis de medição, $\partial T/\partial z$ e $\partial e/\partial z$ são os valores correspondentes aos gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água

Fonte: Modificado de Perez et al (1999)

De posse da Razão de Bowen e utilizando a Equação (1) do balanço de energia para superfícies no meio urbano e desprezando o termo advectivo horizontal, os fluxos de calor latente e sensível podem ser calculados pelas equações 26 e 27, respectivamente:

$$Q_E = \frac{1}{1 + \beta} [(Q^* + Q_F) - \Delta Q_s] \quad \text{Equação 26}$$

$$Q_H = \frac{\beta}{1 + \beta} [(Q^* + Q_F) - \Delta Q_s] \quad \text{Equação 27}$$

Apesar de o método ser relativamente simples, a precisão dos fluxos de calor sensível e latente é função da razão de Bowen (β), a qual é dependente da metodologia e dos equipamentos utilizados nas medições de campo. Os erros introduzidos pela razão de Bowen têm sido avaliados por vários autores ao longo dos anos (KALANDA et al., 1980, PEREZ et al., 1999; FOKEN, 2008). Uma das técnicas bastante utilizada é excluir os dados que estão dentro dos erros instrumentais dos equipamentos utilizados nas medições, ou seja, desconsiderar as medidas dos gradientes que são menores do que a precisão dos sensores. Para evitar que os gradientes de temperatura e umidade específica sejam de pequena magnitude, e recaiam dentro da resolução dos sensores, é recomendável adotar relação entre os níveis de medições de 4 – 8 vezes o que diminui influência dos erros de medição. Para se obter erros menores que 20% ou 40% na razão de Bowen, as diferenças de temperatura e umidade devem ser maiores que 0,6 K ou 0,4 hPa (pressão de vapor d'água), o que implica necessariamente que os sensores sejam posicionados com grandes distâncias entre si (FOKEN, 2008).

O próprio método apresenta uma inconsistência numérica, pois quando os valores de β se aproximam de -1, o denominador das equações 26 e 27 tendem à zero, o que impossibilita o cálculo da razão ou introduz erros consideráveis nas estimativas dos fluxos. Por este motivo, alguns autores eliminam os valores de β menores que - 0,75 ou valores entre os intervalos $-1,3 < \beta < -0,70$ (ORTEGA-FARIAS et al., 1996; UNLAND et al., 1996). No entanto, Perez et al. (1999) destacam que o intervalo exclusão não deve ser fixo, mas dependente da precisão dos sensores utilizados.

Outro aspecto importante a ser considerado é que existe grande diferença no processo de transferência de energia entre o dia e a noite devido à disponibilidade de energia e da estabilidade atmosférica. Erros consideráveis na estimativa da razão de Bowen acontecem no início da manhã e no final da tarde, durante a chuva e/ou irrigação, visto que nesses períodos os fluxos mudam de sentido (sinal) o que faz com os valores de β calculados não sejam passíveis de ser interpretados. Alguns autores consideram apenas como dados confiáveis alguns subconjuntos dos gradientes medidos ou apenas as médias calculadas durante o período diurno, excluindo os dados perdidos devido aos períodos de chuva/ irrigação ou devido problemas de medição (PEREZ et al., 1999).

Os critérios de exclusão dos dados devem ser dependentes das características climáticas do site em estudo. O método da razão de Bowen é bastante adequado para regiões em que as superfícies estejam mais úmidas e quentes que o ar (fluxos positivos de calor sensível e latente da superfície para o ar), ou quando estejam mais fria e seca que o ar (fluxos negativos de calor sensível e latente do ar para as superfícies). Geralmente, em locais com climas áridos e semiáridos, em que a umidade do solo esteja limitada, os gradientes de pressão de vapor durante o dia serão menores que os gradientes de temperatura, o que pode provocar falhas de avaliação no método (PEREZ et al., 1999). Quando os fluxos apresentam sinais contrários, a razão de Bowen se torna negativa, sendo que isto acontece quando a superfície está mais úmida e fria que o ar (efeito oásis) ou ainda quando está mais seca e quente que o ar, como por exemplo, quando uma brisa lacustre fria e úmida penetra sobre uma margem quente e seca (KARAM e PEREIRA FILHO, 2006). Desta forma, algum critério de controle de qualidade precisa ser aplicado aos dados para que os fluxos estimados não apresentem inconsistência numérica, erros instrumentais e/ ou erros de medição. Na sequência serão descritos alguns critérios utilizados para evitar este tipo de problema.

2.4.3.2 Critérios de Qualidade para Avaliação da Razão de Bowen

A constatação de falhas e de resultados inconsistentes na utilização do método da razão de Bowen levaram Perez et al. (1999) a formular critérios objetivos para avaliar quando os fluxos de energia são confiáveis e corretos. Os autores realizaram uma análise física do método para encontrar alguns critérios para rejeitar os dados fisicamente inconsistentes, incluindo os casos que se encontram fora dos limites de precisão instrumental. Através do rearranjo das equações (25), (26) e (27), eles estabeleceram o seguinte critério para a estimativa dos fluxos energéticos:

$$Q^* + Q_F = \left(1 + \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}\right) Q_E + \Delta Q_s \quad \text{Equação 28}$$

$$\frac{\Delta e}{Q_E} = \gamma \frac{\Delta T}{Q_H} = \frac{\Delta e + \gamma \Delta T}{(Q^* + Q_F) - \Delta Q_s} > 0 \quad \text{Equação 29}$$

De acordo com as convenções apresentadas na Figura 7, o sinal da equação (29) deve ser sempre positivo. Assim, os dados obtidos por meio do método da razão de Bowen fornecerão resultados corretos somente quando eles preencherem o pré-requisito apresentado pela inequação (29) para qualquer valor de $(Q^* + Q_F) - \Delta Q_s$. Assim, ao se analisar as equações 26, 27, 28 e 29 é possível estabelecer algumas combinações para os valores de Q_H e Q_E que tornam a inequação (29) verdadeira:

a) $(Q^* + Q_F) - \Delta Q_s > 0$ – condição de validade – $\Delta T > -\Delta e/\gamma$: 1) Se $\beta > -1$, pela análise das equações 25 e 26, é possível deduzir que Q_E deve ser sempre positivo, enquanto Q_H pode ser positivo ou negativo, dependendo do sinal de β ; 2) Se $\beta < -1$, as únicas possibilidades são $Q_E < 0$ e $Q_H > 0$.

b) $(Q^* + Q_F) - \Delta Q_s < 0$ – condição de validade – $\Delta T < -\Delta e/\gamma$: 3) Se $\beta < -1$, as únicas possibilidades para os fluxos são $Q_E > 0$ e $Q_H < 0$; 4) Se $\beta > -1$, Q_E deve ser sempre negativo, enquanto Q_H pode ser positivo ou negativo, dependendo do sinal de β . As condições descritas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições as quais o método BREB deve obedecer na ausência de fluxo advectivo horizontal para que os dados sejam confiáveis e consistentes (equação 29)

Energia disponível no meio	Condição de validade	Pressão de Vapor	Razão de Bowen	Fluxos de Energia
$(Q^* + Q_F) - \Delta Q_s > 0$	$\Delta T > -\Delta e/\gamma$	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	$Q_E < 0$ e $Q_H > 0$
		$\Delta e > 0$	$-1 < \beta < 0$	$Q_E > 0$ e $Q_H < 0$
		$\Delta e > 0$	$\beta > 0$	$Q_E > 0$ e $Q_H > 0$
$(Q^* + Q_F) - \Delta Q_s < 0$	$\Delta T < -\Delta e/\gamma$	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	$Q_E > 0$ e $Q_H < 0$
		$\Delta e > 0$	$-1 < \beta < 0$	$Q_E < 0$ e $Q_H > 0$
		$\Delta e > 0$	$\beta > 0$	$Q_E < 0$ e $Q_H < 0$

Fonte: Modificado de Perez et al. (1999)

Se as condições apresentadas na Tabela 2 não forem satisfeitas, o método da razão de Bowen fornecerá o sentido incorreto dos fluxos energéticos, devendo desta forma, os dados avaliados serem descartados. Conforme destacam Perez et al. (1999), isso geralmente só ocorre no início da manhã e final da tarde, quando fluxos energéticos mudam de sinal, durante a irrigação ou de precipitação com valores baixos de Δe (próximo ao limite de precisão do sensor) e com baixa intensidade de saldo de energia $(Q^* + Q_F) - \Delta Q_s$. Entre as condições apresentadas, existe aquela em que os fluxos de calor latente são negativos, indicando condensação. No entanto, estas situações somente acontecem durante a noite e com atmosfera estável, com diferenças de pressão de vapor muito pequenas ($\Delta e < 0$), dentro da faixa do erro experimental. Por outro lado, quando as condições apresentadas na Tabela 2 não são satisfeitas, um possível transporte de energia horizontal (advecção - ΔQ_A) pode estar acontecendo (BERTELA, 1989). No entanto, quando as condições são cumpridas e mesmo assim ocorre falha no método da razão de Bowen na estimativa dos fluxos energéticos, este fato pode estar relacionado às incertezas nas medições, o que indica que sensores com melhores limites de precisão devem ser utilizados. Outra possibilidade é quando as condições atmosféricas mudam de forma muito rápida e os gradientes médios estimados ao longo de um determinado tempo t podem não ser representativos dos fluxos médios de energia avaliados ao longo deste período.

Além das considerações anteriores, outro aspecto importante é quando o valor de β se aproxima de -1, uma vez que as equações apresentadas em (26) e (27) são singulares para $\beta = -1$, o que torna a estimativa de Q_H e Q_E impossível de ser realizada, pois estas perdem o seu significado físico. Os valores de $\beta = -1$ ocorrem

normalmente no início da manhã, no final da tarde ou durante a precipitação quando o sentido do gradiente de temperatura se opõe ao sentido apresentado pelo gradiente de pressão do vapor ($\Delta T > 0$ e $\Delta e < 0$ ou $\Delta T < 0$ e $\Delta e > 0$).

Como já relatado, vários pesquisadores adotam como critério eliminar o intervalo $-1,25 < \beta < -0,75$ nas análises realizadas, para evitar erro numérico ou introduzir erros consideráveis na avaliação do fluxo de calor sensível e latente. No entanto, os limites de eliminação dependem da precisão das medições realizadas, ou seja, da precisão dos sensores. Outros autores costumam eliminar os fluxos que recaem dentro da faixa do erro elétrico do sensor. No entanto, conforme destacam Dugas et al. (1991), os erros de medições de temperatura e umidade na atmosfera são significativamente maiores do que o erro elétrico do sensor.

Perez et al. (1999) realizaram análise de erro para β , e chegaram a uma expressão para avaliar o intervalo de exclusão de β quando este se aproxima de -1 ($-1 - |\varepsilon| < \beta < -1 + |\varepsilon|$) a partir do erro nas imediações de β ($\varepsilon = \delta\beta$) devido à precisão dos sensores. Assim, o intervalo de exclusão de β é avaliado a partir da quantidade adimensional:

$$\varepsilon = \frac{\delta\Delta e - \gamma\delta\Delta T}{\Delta e} \quad \text{Equação 30}$$

Com a utilização da quantidade adimensional para estimativa do erro representada pela equação 30, ao invés do intervalo de exclusão de β ao redor de -1 ser um valor fixo, ele passa a ser dependente do gradiente de pressão de vapor medido no período t e da precisão dos sensores utilizados ($\delta\Delta T$, precisão dos sensores de temperatura e $\delta\Delta e$, precisão dos sensores de umidade). A equação (30) fornece um critério de fácil identificação quando o método da razão de Bowen apresenta resultados insatisfatórios nas proximidades de $\beta = -1$.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1 A CIDADE DE CUIABÁ - MT

O município de Cuiabá está localizado na região Centro-Oeste do Brasil, no estado de Mato Grosso (Figura 8). Insere-se dentro da mesorregião Norte-Matogrossense, na microrregião Cuiabá, nas coordenadas geográficas $15^{\circ} 35' 56''$ de latitude sul (S) e $56^{\circ} 06' 01''$ de longitude Oeste (W) de Greenwich (Gr). Possui área de $3538,17 \text{ km}^2$, sendo que $254,57 \text{ km}^2$ (perímetro da cidade) correspondem à área de macrozona urbana e $3283,60 \text{ km}^2$ à área rural. A distância entre os seus pontos extremos é de $79,50 \text{ km}$ entre os paralelos 15° (norte) e $15^{\circ} 50'$ (sul), e de $94,90 \text{ km}$ entre os meridianos $55^{\circ}30'$ (leste) e $56^{\circ}20'$ (oeste).

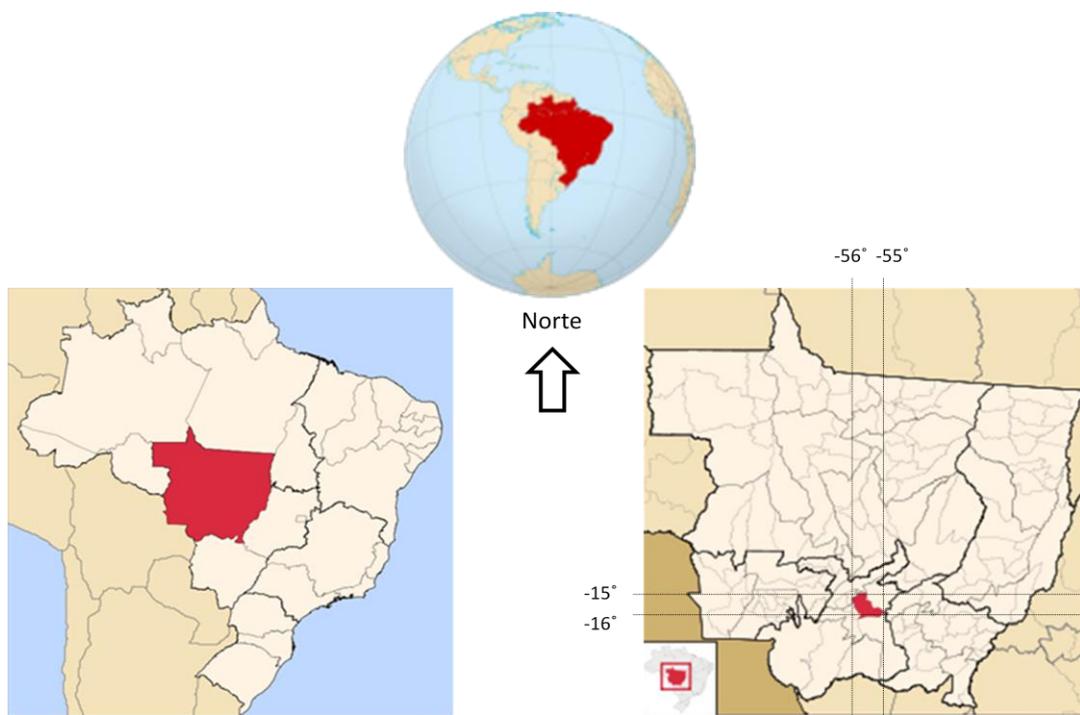


Figura 8 – Localização da cidade de Cuiabá no estado de Mato Grosso e no Brasil

As seguintes cidades fazem limites com o município de Cuiabá: Acorizal, Rosário Oeste e Chapada dos Guimarães ao Norte, Chapada dos Guimarães a Leste, Santo Antonio do Leveger ao Sul e Várzea Grande e Acorizal à Oeste (Figura 9).

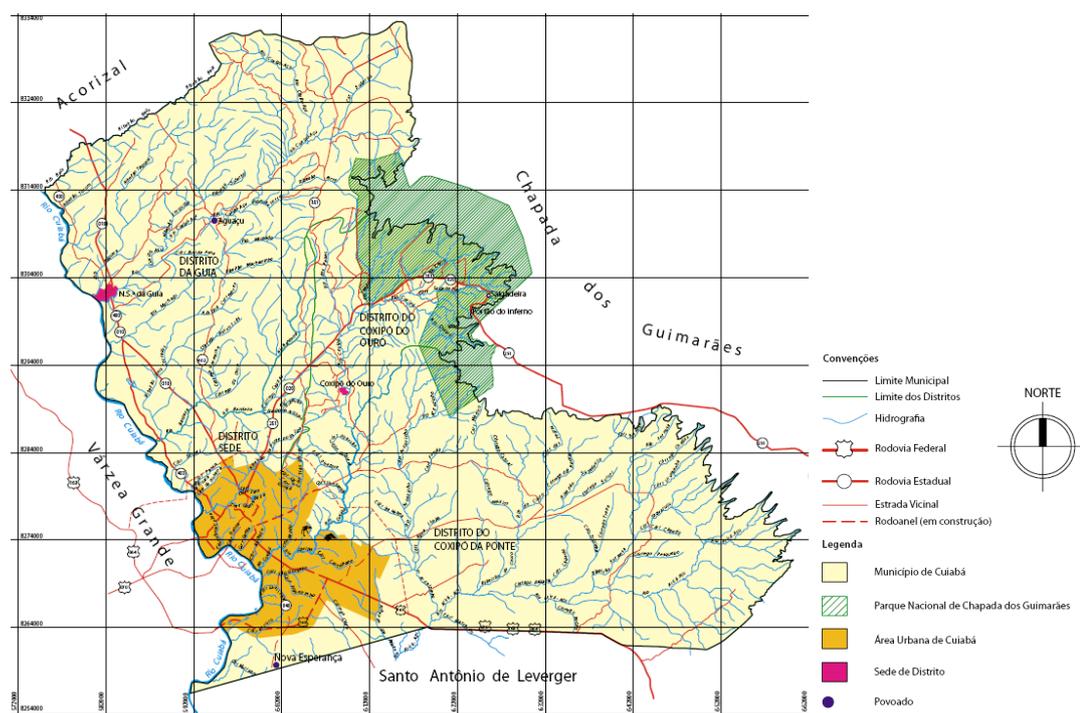


Figura 9 – Mapa do Município de Cuiabá – MT

Fonte: IPDU (2009)

Sob o aspecto geomorfológico, a cidade se situa na província da baixada Cuiabana (integrante da depressão do Rio Paraguai) que consiste em uma planície de erosão onde predominam relevos de baixas altitudes (Figura 10), sendo que nas áreas urbanas elas variam entre 146 a 259 metros. Cuiabá é banhada pelo rio Cuiabá que limita o município com a cidade de Várzea Grande. Em 2009, a lei que criou o conglomerado urbano de Cuiabá e Várzea Grande foi revogada pela atual lei que instituiu a Região Metropolitana do Vale do Rio Cuiabá, que passou a ser formada pelos municípios de Cuiabá, Várzea Grande, Nossa Senhora do Livramento e Santo Antônio do Leverger.

A cidade situa-se na confluência de três importantes ecossistemas brasileiros: o Pantanal ao sul, o Cerrado no seu entorno e a floresta Amazônica ao norte. A vegetação predominante na região é o Cerrado, sendo que as matas mais densas são encontradas nas proximidades dos cursos d'água. Na cidade, a vegetação é encontrada principalmente em praças, nos domicílios e ao longo da malha viária.

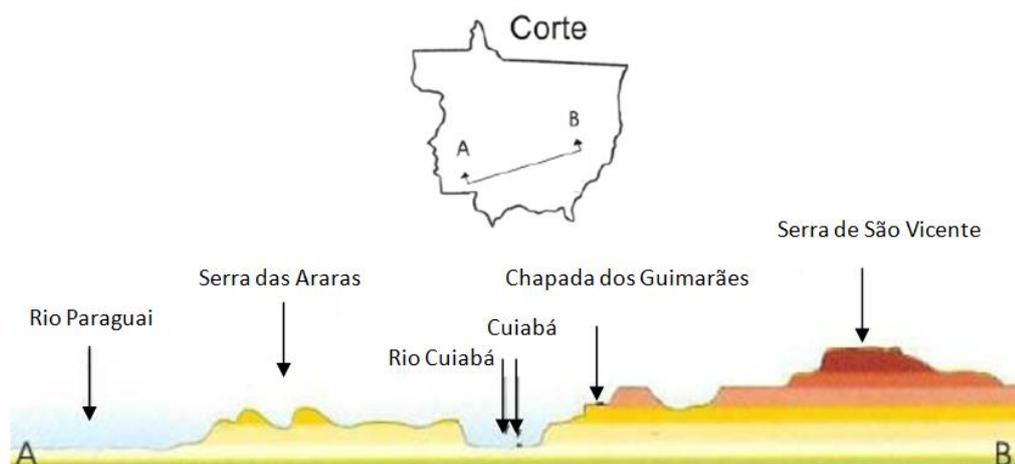


Figura 10 – Corte esquemático do Mapa Físico do Mato Grosso

Fonte: Moreno et al. (2005)

Sob o aspecto demográfico, destaca-se que entre as décadas de 40 e 50 a cidade passou por um período de estagnação no seu crescimento populacional. Fato este que se reverteu durante a década de 60, quando o governo brasileiro desencadeou a política de ocupação da Amazônia meridional. Cuiabá passou a ser centro de apoio a ocupação e de fluxos migratórios (“Portal da Amazônia”) devido à sua posição estratégica de única alternativa de acesso por terra para ocupação da região norte do país. Como consequência, o município apresentou intenso crescimento populacional e transformação espacial. A Tabela 3 resume o crescimento populacional por qual passou o município desde 1960 até 2010. Observa-se que a cidade de Cuiabá apresentou uma variação populacional de 852% durante os 50 anos de dados apresentados, fato este que se refletiu na modificação do uso e ocupação do solo da cidade, principalmente pela substituição da vegetação nativa do cerrado, por áreas construídas e impermeabilizadas.

Tabela 3 – Dados demográficos do município de Cuiabá-MT.

Ano	População Município (hab)	Variação Populacional (%)	Taxa. Media Geométrica Crescimento a.a.(%)	Área Urbana (km ²)	Densidade Demográfica (ha/km ²)
1960	57.860	2,95	0,29	4,5	-
1970	100.865	74,33	5,71	48,45	-
1980	212.984	111,16	7,76	153,06	0,17
1991	402.813	89,13	5,96	251,94	1,25
2000	483.346	19,99	2,77	256,31	1,50
2010	540.814*	14,06	1,01	254,57	1,56

Fonte: IPDU (2009), * IBGE (2011)

3.2 CLIMA

Segundo classificação apresentada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o clima em Cuiabá é do tipo tropical continental de estação úmida e seca com 4 a 5 meses. Por outro lado, ao se utilizar a metodologia proposta por Köppen-Geiger (1928), o clima da cidade passa a ser classificado como sendo tropical com estação seca (*Aw* - clima de savana). O clima *Aw* pertence ao tipo megatérmico do grupo 'A' com característica de apresentar em todos os meses do ano temperatura média mensal superior a 18°C, sendo que em pelo menos um dos meses do ano há precipitação média total inferior a 60 mm. Dos subtipos propostos pela classificação, o 'w' é a que melhor se adequa a região, pois estabelece que haja chuvas de verão. Para Duarte (2000), o clima da região é definido por três períodos distintos: uma estação seca e mais fresca no inverno; uma estação de transição seca e mais quente, um pouco antes das chuvas e, uma estação úmida e quente, durante as chuvas do verão.

Campelo Jr. et al. (1991) realizaram caracterização microclimática de Cuiabá, utilizando dados do período de 1970 a 1989. Nessa caracterização foram levantadas as médias e desvio padrão da temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, módulo da velocidade do vento e direção, pressão atmosférica, entre outros elementos do clima (Figura 11 a Figura 14). De acordo com a caracterização microclimática realizada, as temperaturas médias mais elevadas foram verificadas em outubro e novembro devido à ação da Massa Tropical Continental (Figura 11). As menores médias temperaturas foram verificadas nos períodos de junho e julho, período de inverno, que ocorrem em consequência da inversão da Massa Polar do Atlântico. Com relação à umidade do ar, é possível perceber que ela se eleva com o início do período úmido, atingindo os maiores valores durante o verão, período de maior precipitação pluviométrica na região. Durante o outono, a umidade do ar inicia o seu declínio em consequência da diminuição da precipitação, alcançado os menores valores no inverno, em agosto.

Maitelli (1994), ao caracterizar o clima da região, descreve que as temperaturas se mantêm elevadas durante a primavera-verão, principalmente durante a primavera, devido à passagem do Sol sobre os paralelos da região em direção ao Trópico de Capricórnio e ao início da estação chuvosa. Por outro lado, no inverno,

registram-se temperaturas do ar mais estáveis, baixa umidade do ar, altas amplitudes térmicas diárias e temperatura máximas elevadas. De acordo com a autora, é comum se verificar baixas temperaturas, resultantes da invasão do Anticiclone Polar, que após passar sobre o Oceano Pacífico, transpõe a Cordilheira dos Andes, e penetram na região Centro-Oeste do Brasil, atingindo o estado de Mato Grosso. A ação direta do Anticiclone Polar dá-se o nome de “friagem” e sua duração é, em média, de três a quatro dias.

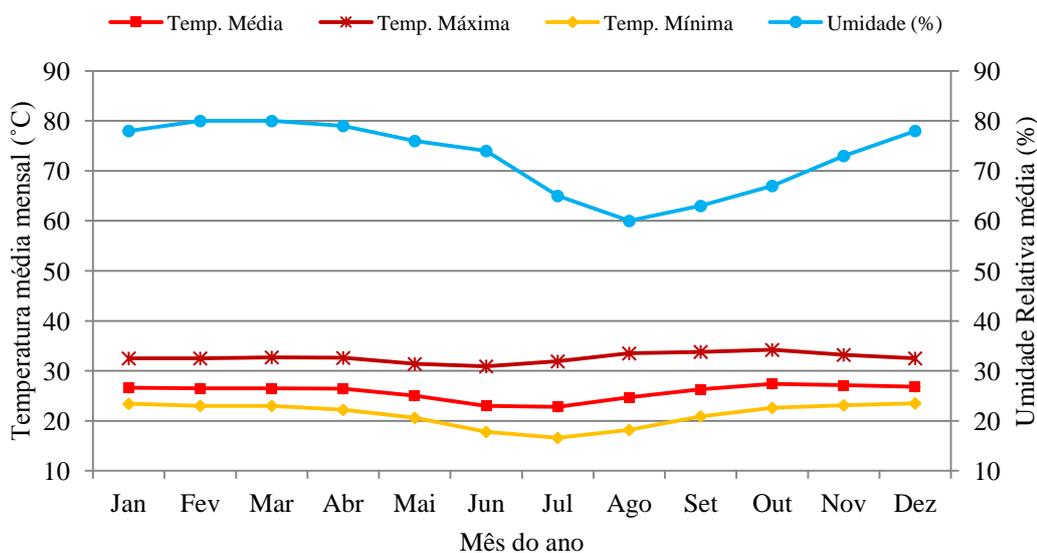


Figura 11 – Temperatura e Umidade, médias mensais para Cuiabá

Fonte: Adaptado de Campelo Jr. et al. (1991)

Ao se analisar a pressão atmosférica, observa-se uma nítida relação entre esta e o módulo da velocidade do vento (Figura 12). De janeiro a Julho, a pressão atmosférica se eleva na região, o que traz como consequência a redução do módulo da velocidade do vento. De julho a dezembro, a pressão atmosférica se reduz, e o módulo da velocidade do vento aumenta, atingindo média máxima em dezembro (1,04 m/s). Conforme destacam Campelo Jr. et al. (1991), apesar da velocidade do vento ser relativamente baixa, ocorrem rajadas (picos de curta duração) que podem atingir valores de até 35,9 m/s (129,3 km/h), com período de retorno de 25 anos. Com relação à direção dos ventos predominantes (Figura 13), a maior frequência relativa da direção dos ventos no período de outubro a maio é a norte (N), seguida da direção noroeste (NO). Entre abril e setembro, o vento Sul (S) predomina seguido do vento de direção Norte (N). Duarte (1995) encontrou resultados semelhantes: direção

do vento predominante N (norte) e NO (noroeste) durante boa parte do ano, e S (sul) no período de inverno.

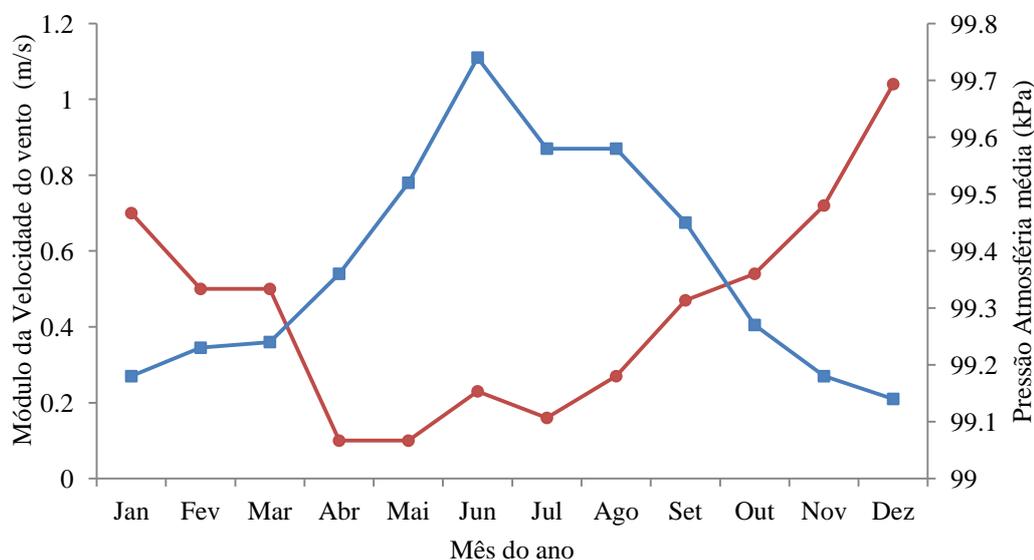


Figura 12 – Pressão (marcador azul) e módulo da velocidade do vento (marcador círculo) média mensal para Cuiabá

Fonte: Adaptado de Campelo Jr. et al. (1991)

O regime de chuvas na Região Centro-Oeste é fortemente influenciado pelo sistema de Circulação Atmosférica Regional e pela Massa Equatorial Continental, originada na Amazônia Central (Zona de Convergência Intertropical - ZCIT). Por esse motivo, as chuvas são distribuídas ao longo do ano e tipicamente tropicais. No caso específico dos dados de precipitação pluviométrica apresentado por Campelo Jr. et al. (1991), a série temporal analisada é maior, entre os anos de 1901 a 1989. A média pluviométrica anual encontrada foi de 1346,9 mm. As máximas chuvas são verificadas entre os meses de outubro a abril, e mínimas entre os meses de maio a setembro. Junho, julho e agosto são os meses mais secos e os de dezembro, janeiro, fevereiro e março, os que apresentam maior precipitação. Os meses de abril e outubro se caracterizam como de transição do período úmido para o seco, e do seco para o úmido, respectivamente (Figura 14).

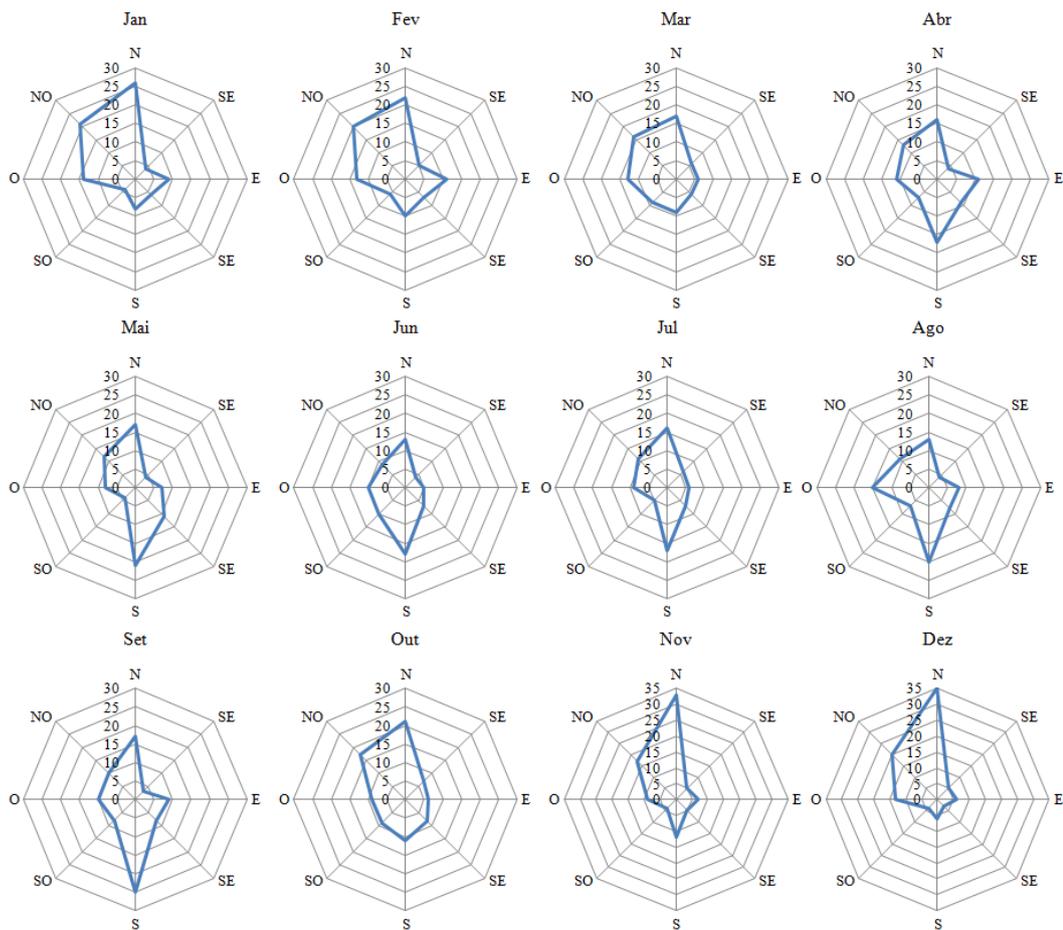


Figura 13 – Frequência relativa média do vento durante os meses do ano
Fonte: Adaptado de Campelo Jr. et al. (1991)

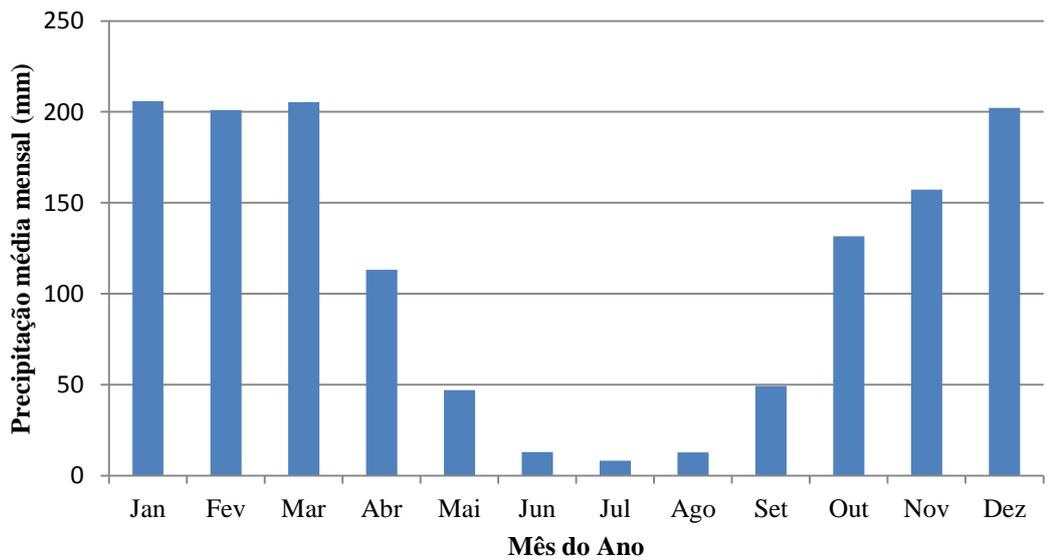


Figura 14 – Precipitações médias mensais em Cuiabá
Fonte: Adaptado de Campelo Jr. et al. (1991)

3.3 EVOLUÇÃO URBANA DE CUIABÁ

A primeira regulamentação do perímetro urbano de Cuiabá se deu em 1938 e estabeleceu uma área de 2,59 km² para a cidade. No entanto, a definição das zonas urbanas e suburbanas somente foi definida em 1960, abrangendo uma área urbana de 4,5 km² (IPDU, 2009).

Na década de 60, Cuiabá passa por uma grande modificação no seu ciclo evolutivo, em virtude de incentivos fiscais federais que tinham por objetivo promover a integração nacional e a política de ocupação da Amazônia. Esses incentivos intensificaram o processo de ocupação da Amazônia Mato-grossense, fazendo com que Cuiabá passasse a ser centro de apoio a ocupação e de fluxos migratórios devido à sua posição estratégica de única alternativa de acesso por terra para ocupação da região norte do país. Isso trouxe como consequência a demanda por novos espaços e por maior de infraestrutura na cidade.

O vertiginoso crescimento populacional ocorrido nas décadas de 60 e 70 (Tabela 4) contribuiu para que área urbana não fosse capaz de suportar todo o fluxo migratório ocorrido durante esse período, o que desencadeou processo de ampliação do limite do perímetro urbano da cidade para 48,45, 104,98 e 153,06 km², respectivamente, em 1974, 1978 e 1982 (IPDU, 2009).

O intenso crescimento continuou a acontecer na década de 80, o que fez com que as autoridades públicas estaduais e municipais construíssem diversos núcleos habitacionais para acomodação dessa população, muito deles localizados fora do perímetro urbano, o que ocasionou muitos transtornos aos proprietários dessas habitações, visto que os mesmos não podiam regularizar seus imóveis devido à legislação urbana vigente à época. Nova lei do perímetro urbano somente seria sancionada em 1994, observando a necessidade de ampliação de áreas para receber empreendimentos de maior porte, que pudessem causar impacto na cidade, prejudicando as funções urbanas que estavam em vigor à época. Diante dos fatos mencionados e da demanda originada pela construção da Rodovia dos Imigrantes, foi sancionada a lei expandindo o perímetro urbano para 251,94 km², que, a partir desse momento, passou a ser denominado de Macrozona Urbana (IPDU, 2009).

Em 2004, o perímetro urbano foi alterado com a finalidade de incorporar a região do Sucuri, a fim de que fosse construído conjunto habitacional municipal

destinado ao assentamento de pessoas moradoras em áreas de risco de inundação, estabelecendo uma nova área do perímetro urbano, 252,58 km². No mesmo ano, o limite do perímetro urbano foi ampliado em 1,99 km², sem nenhum embasamento técnico, conforme destaca IPDU (2009), passando a Macrozona Urbana a contar 254,57 km² (IPDU, 2009).

O sucessivo acréscimo de área ao perímetro urbano trouxe como consequência a presença de áreas vazias e ociosas dentro da cidade, bem como baixa densidade demográfica (20,88 hab/ha, quando o ideal seria 250 hab/ha) e alto custo-cidade, visto que, conforme destaca a Constituição Brasileira, é obrigação do poder público municipal manter toda infraestrutura necessária a uma cidade, assim como os seus serviços públicos. Diante destes fatos, em 2007, o Plano Diretor Estratégico de Cuiabá determinou a proibição da ampliação do perímetro urbano pelo período de 10 (dez) anos. Assim sendo, desde 2007, o perímetro urbano da cidade não tem se alterado em virtude de lei. Na Figura 15 é possível visualizar a evolução do perímetro urbano da cidade de Cuiabá.

Tabela 4 – Evolução do Perímetro Urbano de Cuiabá

Ano	Lei n°	Área (km ²)	Acréscimo (km ²)	Variação (%)	População Urbana (hab)	Variação (%)	Densidade (hab/ha)
jul/38	176	2,59	-	-	-	-	-
jul/60	534	4,5	1,91	73,75	45.875	-	101,94
mar/74	1346	48,45	43,95	976,67	122.284	166,56	25,24
abr/78	1537	104,98	56,53	116,68	164.896	34,85	15,71
nov/82	2023	153,06	48,08	45,80	222.303	34,81	14,52
dez/94	3412	251,94	98,88	64,60	420.044	88,95	16,67
jul/04	4598	252,58	0,64	0,25	531.504	26,54	21,04
dez/04	4719	254,57	1,99	0,79	531.504	0,00	20,88
dez/10	150*	254,57	0	0,00	551.310**	3,73	21,66

Fonte: Adaptado do IPDU (2009); * lei complementar; **IBGE (2010)

Com intuito de aproximar o poder público à comunidade local, a cidade de Cuiabá foi dividida em quatro regiões administrativas: Região Norte (Morada da Serra e arredores), Região Sul (Coxipó), Região Leste (bairros localizados à margem esquerda do córrego Prainha, seguindo pela Av. Historiador Rubens de Mendonça, Shopping Pantanal, em direção ao bairro Planalto) e Região Oeste (bairros localizados à margem direita do córrego Prainha, incluindo os Bairros Alvorada, Despraiado, entre outros), conforme apresentado na Figura 16.

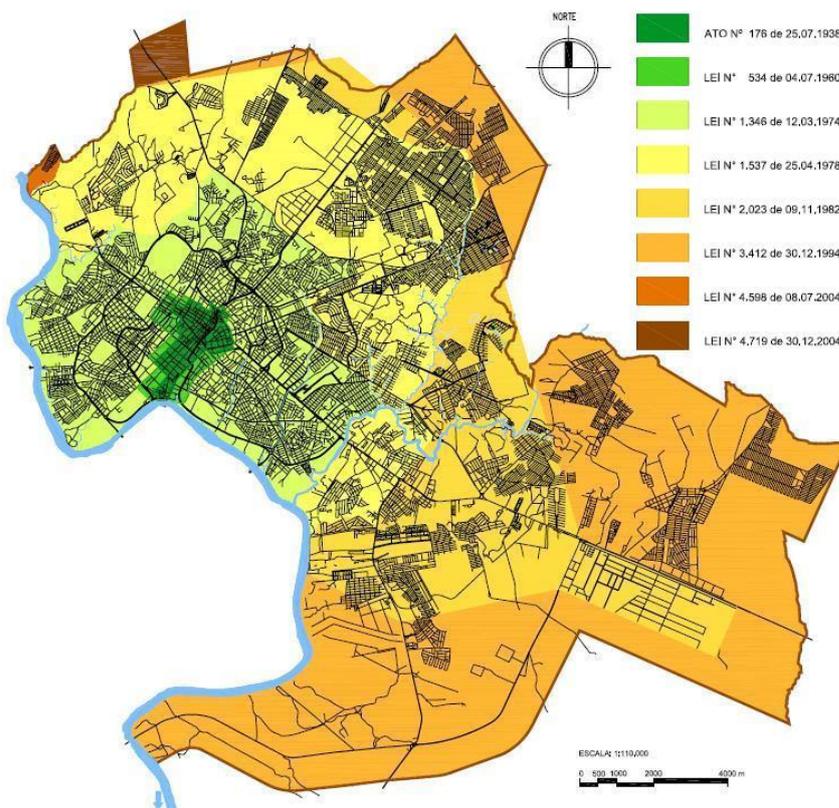


Figura 15– Evolução do perímetro urbano da Cidade de Cuiabá
Fonte: IPDU (2009)

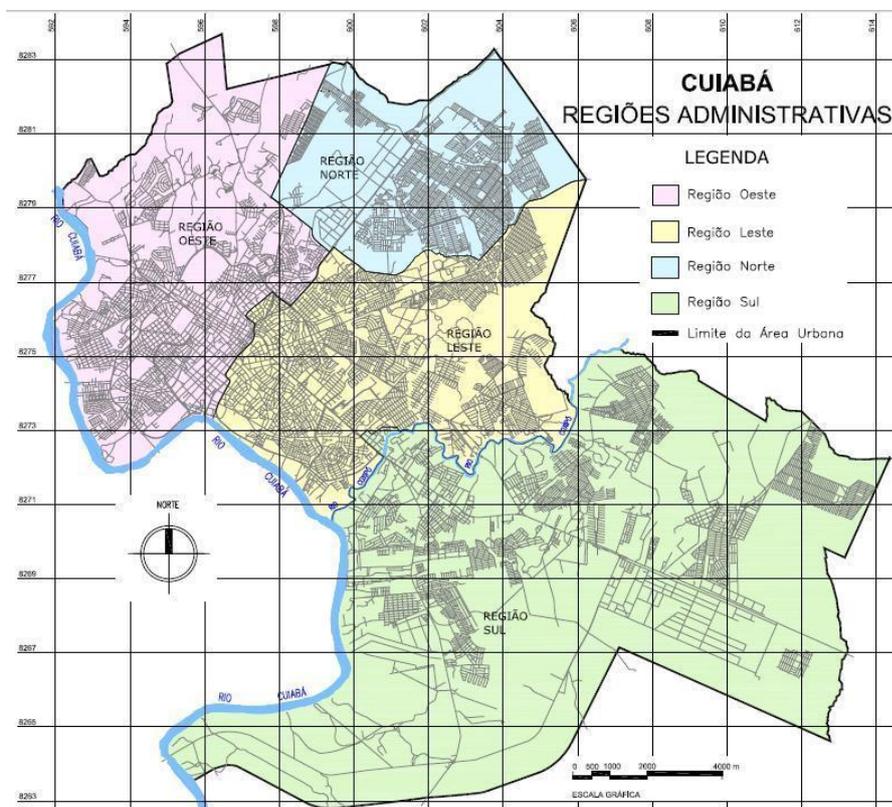


Figura 16 – Organização Geopolítica de Cuiabá
Fonte: IPDU (2009)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Instrumentação dos Sítios Urbanos 1, 2 e 3

A coleta de dados foi realizada nos sítios urbanos no período de 01/09/10 a 31/08/12 através dos seguintes equipamentos micrometeorológicos fixados em mastros metálicos localizados nos pátios centrais das escolas inseridas dentro de cada área pesquisada:

a) três Termo-Higrômetros, Marca OnsetComp, Modelo S-THB (níveis 2,5, 3,75 e 5 m de altura) para avaliação do perfil de temperatura e umidade do ar (temperatura – precisão de 0,2°C e resolução de 0,02°C entre 0°C a 50°C; umidade – precisão de $\pm 2,5\%$ e resolução de 0,1% entre 10% a 90%)

b) um saldo radiômetro, Marca Kipp & Zonen Delft, Modelo NR-Lite2 Net Radiometer (nível de 3,75m de altura) para medição da radiação líquida (Faixa espectral – 0,2 a 100 μm ; erro direcional: de 0 a 60°C com 1000 W m^{-2} - $< 30 \text{ W m}^{-2}$);

c) um Piranômetro Marca OnsetComp, Modelo S-LIB (nível de 4m de altura), para a avaliação da radiação solar global incidente (Faixa de leitura – 0 - 1280 W m^{-2} ; precisão de $\pm 10 \text{ W m}^{-2}$ ou 5%; resolução de $1,25 \text{ W m}^{-2}$);

d) um Fluxímetro, Marca REBS, Inc., Seattle, Washington, Modelo HFT-3.1 (em contato direto com as placas de concreto a uma profundidade de aproximadamente 5 cm em relação ao nível do solo, instalado dentro de caixas de passagem existentes nos pátios junto aos postes metálicos) para avaliação do fluxo de calor no concreto – ver Figura 17e (faixa de leitura 0 – 2000 W m^{-2} ; precisão de -15% a +5% na maioria dos solos); e,

e) três Anemômetros de conchas, Marca OnsetComp, Modelo S-WSA (velocidade) e S-WCA (velocidade e direção), (níveis de 2,5, 3,75 e 5 m) para avaliação do perfil de velocidade do vento (faixa de medição: 0 a 45m/s; precisão de 1,1 m/s ou $\pm 4\%$; resolução de 0,38 m/s);

Os dados produzidos pelos sinais e/ou pulsos elétricos dos sensores dos equipamentos meteorológicos foram processados e armazenados por Datalogger, Marca OnsetComp, Modelo U30-NRC-VIA-10-S100-000 em intervalos de 10s, com médias a cada 5 minutos, sendo posteriormente os dados reprocessados para

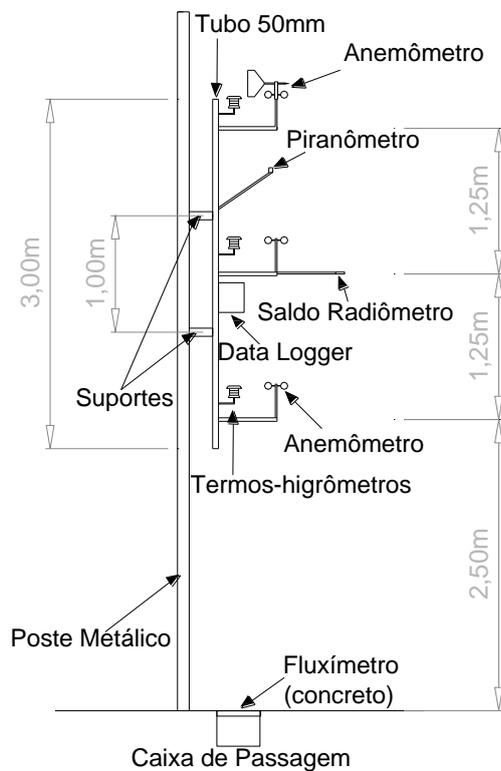
intervalos de 30 minutos. Os dados de precipitação diária, pressão atmosférica média diária, de temperatura e umidade do ar máxima, mínima e média mensal foram obtidos na Estação Meteorológica do Aeroporto Marechal Rondon, localizado na Cidade Várzea Grande, MT.



a)

b)

c)



(d)



(e)

Figura 17 – Estações meteorológicas instaladas no Sítio 1 (a), Sítio 2 (b) e Sítio 3 (c), (d) esquema de montagem das estações e (e) detalhe de instalação do fluxímetro no concreto

4.2 MÉTODO

4.2.1 Sítios Intraurbanos

No presente trabalho foram selecionados três sítios para estudo microclimático localizadas em posições distintas na cidade de Cuiabá - MT: Sítio 1 situada na região leste no bairro Areão ($15^{\circ}35'47,83\text{S}$, $56^{\circ}04'45,10\text{W}$, 196,83m), Sítio 2 na região oeste, no bairro Jardim Cuiabá ($15^{\circ}35'43,79\text{S}$, $56^{\circ}07'08,70\text{W}$, 180,35 m) e Sítio 3 na região norte, no bairro Morada da Serra ($15^{\circ}33'21,11\text{S}$, $56^{\circ}03'08,29\text{W}$, 233,88 m) (Figura 18). As distâncias dos sítios em relação ao centro da cidade são 1,71, 2,62, 6,55 km, respectivamente, enquanto as distâncias relativas entre as áreas 1-2, 1-3 e 2-3 são 4,29, 5,30 e 8,35 km.

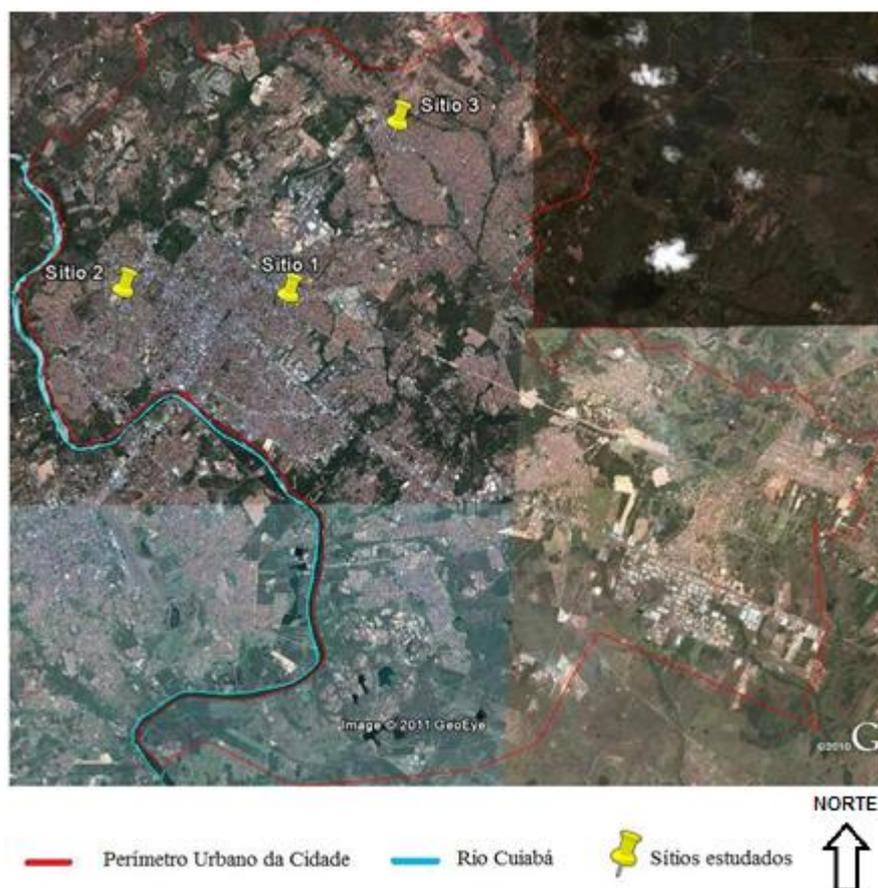


Figura 18 – Sítios intraurbanos 1, 2 e 3 adotados para estudo microclimático de Cuiabá-MT

Os locais onde os equipamentos de medições para o estudo microclimático foram instalados são escolas da Rede Pública Estadual de Ensino: Sítio 1 – Escola Estadual João Briene de Camargo, Sítio 2 – Escola Estadual Prof. Ulisses Cuiabano e Sítio 3 – André Avelino Ribeiro (Figura 19). As escolas são constituídas por

edificações semelhantes com mesmo partido arquitetônico e implantadas em locais da cidade de Cuiabá com características de uso e ocupação do solo nos seus entorno com características distintas. O padrão arquitetônico adotado nessas escolas é composto por um pátio central e blocos lineares simetricamente distribuídos. As maiores diferenças entre elas se devem a orientação das edificações dentro do terreno, a presença da vegetação e ao local onde foram implantadas na cidade.

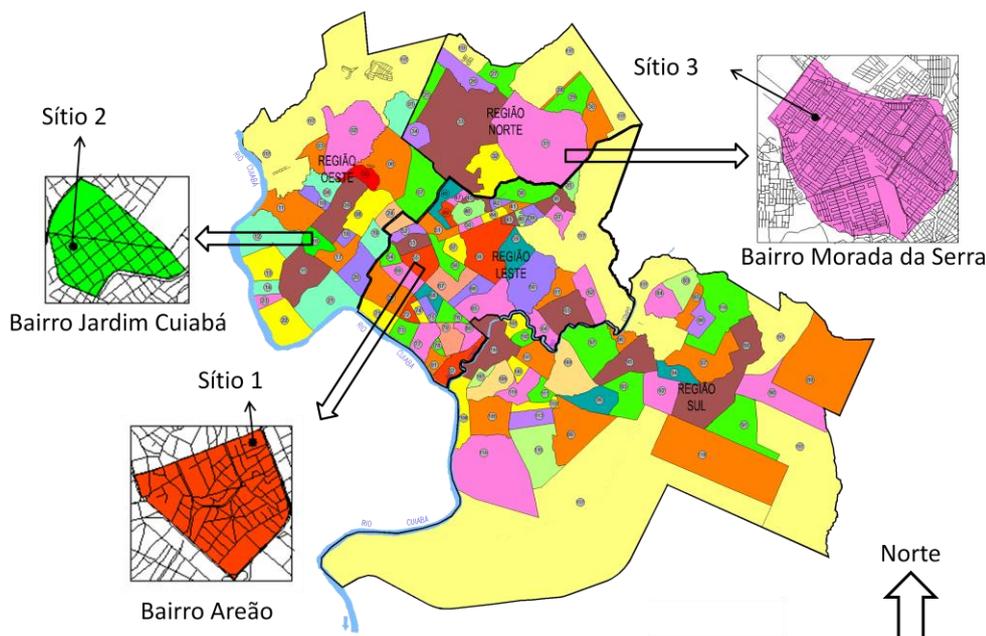


Figura 19 – Abairramento de Cuiabá e localização dos sítios intraurbanos 1, 2 e 3

4.2.1.1 Sítio 1 – Escola Estadual João Briene de Camargo

a) Bairro Areão

O bairro Areão está localizado na região leste da cidade, a uma distância de aproximadamente 1,45 km do centro da cidade. Passou a integralizar a área urbana a partir de 1973. Possui área de 104,75 ha e população de 5.821 habitantes, o que lhe confere uma densidade populacional de 55,57 hab/ha. O bairro possui topografia bastante acentuada, sendo que menor altitude observada é de 173 m nas proximidades da Av. Fernando Correa da Costa (junto ao Córrego do Gambá) e a maior, nas proximidades do Sítio 1 com 202m, na intersecção da Av. João Gomes Sobrinho com a Av. Miguel Sutil. O bairro apresenta 1.511 domicílios e a grande maioria da população reside em casas e em apartamentos, o que caracteriza o bairro como tipicamente residencial. As edificações residenciais apresentam tipologia característica: com paredes de alvenaria e telhados de telha cerâmica. As edificações

comerciais se concentram nos principais corredores de tráficos do bairro: as Avenidas Fernando Correa da Costa, Miguel Sutil e João Gomes Pereira Sobrinho, avenidas estas que contornam todo o perímetro do bairro. Muitas dessas edificações possuem mais de um pavimento, o que faz com que o gabarito destas edificações muitas vezes exceda o gabarito médio das edificações residenciais, que varia de 3 a 4 metros de altura. Não há áreas destinadas a parques no bairro, sendo que a vegetação existente se localiza principalmente nos fundos e nas frentes dos lotes residenciais. É visível através de fotos de satélite (Figura 20) que a percentagem de área vegetada no bairro é muito inferior a área construída. Observa-se a existência de poucos lotes não edificadas ao sul, acompanhando o córrego do Gambá. As Avenidas citadas apresentam intenso tráfego de veículo, sendo as principais responsáveis pela disseminação de ruído e poluição de gases no ambiente, principalmente nas regiões periféricas do bairro.

b) Entorno do Sítio 1

A Escola Estadual João Briene de Camargo está localizada no final da Av. João Gomes Pereira Sobrinho, encontro com a Av. Miguel Sutil. Devido à proximidade a essas avenidas, os lotes do entorno da escola são tipicamente comerciais, com exceção a sudeste, em que os lotes são residenciais (Figura 20).

O gabarito das construções comerciais variam entre 4 e 8 metros, principalmente a nordeste, local em que essas edificações foram um paredão junto ao muro de divisa da escola, o que dificulta a penetração de vento nessa direção. Comportamento semelhante se observa na divisa localizada a sudeste devido a presença da Escola Estadual Livre Aprender que possui gabarito de 6 metros (dois pavimentos). Como a escola se localiza em terreno inclinado, as edificações a sudoeste, tipicamente residenciais e de baixo gabarito, oferecem pouca resistência a penetração dos ventos. A noroeste, as edificações comerciais são de menor porte, adaptações de edificações residenciais. Atrás destas edificações, existe uma área gramada destinada à prática de esportes (campo de futebol). A principal característica do entorno é a presença de intensa movimentação de veículos devido à presença da Av. João Gomes Sobrinho e Miguel Sutil, classificadas como uma via principal e estrutural, respectivamente, conforme hierarquização viária da cidade (IPDU, 2009).



Figura 20 – Entorno da Escola Estadual João Briene Camargo – raio de 500 m

Fonte: Google Earth

c) Características da Escola Estadual João Briene de Camargo

A E. E. João Briene Camargo foi edificada no início da década 80 e apresenta padrão arquitetônico constituído por blocos com salas de aula paralelamente distribuídos em relação ao pátio central da escola (Figura 21).



Figura 21– Imagem de satélite da E. E. João Briene Camargo

Fonte: Google Earth

Construtivamente, é composta por elementos estruturais de concreto armado que formam pórticos linearmente espaçados. As paredes de fechamento são de alvenaria, o telhado em duas águas, coberto por telha de fibrocimento do tipo canaleta, e as aberturas de portas e janelas confeccionadas com esquadrias metálicas. A escola encontra-se recuada em relação à Av. João Gomes Sobrinho, havendo desta forma área não edificada frontalmente à escola (Figura 22 e Figura 22a).

Os blocos se encontram distribuídos paralelamente à avenida citada. Ao se adentrar pelo portão de acesso, à esquerda existe pátio cívico e área destinada ao estacionamento de veículos (Figura 22b). À direita, nota-se a existência de um pátio de recreação, com presença de parque e quadra de futebol demarcada no piso de concreto (Figura 22c). Mais a frente, observa-se os primeiros blocos de salas de aula e o pátio central (Figura 22d). Entre todos os blocos existe um espaço destinado à circulação e acesso às salas de aula pelos alunos e professores (pátios de circulação, Figura 22e). Nos fundos, ocupando área que anteriormente pertencia à escola, foi edificada a Escola Estadual Livre Aprender destinada a pessoas portadoras de necessidades especiais. Com relação à pavimentação das superfícies, nas áreas externas, junto a Av. João Gomes Sobrinho, verifica-se a presença de concreto na via de acesso ao estacionamento da escola e no passeio de acesso ao portão principal. As demais áreas externas são revestidas com brita e grama, sendo que esta última cobre o talude frontal devido ao declive existente na região de acesso à escola. Constatase que existem áreas externas onde o solo se encontra descoberto (Figura 21). Os pátios central, de recreação e parte do pátio cívico são cobertos por concreto, enquanto a área de estacionamento e os pátios de circulação por brita. No entorno da quadra poliesportiva, não há presença de revestimento (solo descoberto). Com relação à vegetação existente, constata-se que a mesma foi plantada provavelmente em época posterior a construção da escola, e localizam-se principalmente na área de acesso a escola (região frontal, Figura 22a), junto ao pátio de estacionamento (Figura 22b) e nos pátios de circulação (Figura 22e). No pátio central, observa-se presença de vegetação de pequeno porte, ainda em fase de crescimento (Figura 22d). A área total do terreno da escola é de aproximadamente 12.730 m², sendo que 2.468 m² estão edificados. A área impermeabilizada é de aproximadamente 5.906 m², ou seja,

46,40% da área total e a projeção do diâmetro das copas sobre a superfície do solo é de aproximadamente 792 m², aproximadamente 6,22% da área do terreno.



Figura 22 – Fotos da escola: a) Região frontal da escola, b) Estacionamento, c) Espaço para recreação, d) Pátio Central, e) Pátios de Circulação

4.2.1.2 Sítio 2 – Escola Estadual Prof. Ulisses Cuiabano

a) Bairro Jardim Cuiabá

O bairro Jardim Cuiabá está localizado na região oeste, a uma distância de aproximadamente 2,26 km do centro da cidade. Assim como, o bairro Areão passou a integrar a área urbana em 1973. Possui área de 69,45 ha e população de 1.508 habitantes, o que lhe confere uma densidade populacional de 15,95 hab/ha. O bairro possui topografia também acentuada, sendo que menor altitude observada é de 168m

na intersecção da Av. Senador Metello com a Av. 8 de Abril (junto ao córrego de mesmo nome), e a maior, nas proximidades do Sítio 2, com 193m, junto a Av. das Flores intersecção com Av. Miguel Sutil. O bairro apresenta 282 domicílios e a maioria da população reside em casas, o que caracteriza o bairro como tipicamente residencial. Similarmente ao que acontece no bairro Areão, as edificações residenciais apresentam tipologia característica composta por paredes de alvenaria e telhados de telha cerâmica. As edificações comerciais se concentram nos principais corredores de tráficos do bairro: as Avenidas Miguel Sutil, Senador Metello e Avenida das Flores, sendo que esta última divide o bairro em duas partes. Essas edificações muitas vezes possuem mais de um pavimento o que faz com que o gabarito exceda o gabarito médio das edificações residenciais, que é de aproximadamente 3 a 4 metros de altura. Não há áreas destinadas a parques no bairro, sendo que a vegetação existente se localiza principalmente nos fundos e nas frentes dos lotes residenciais, em uma grande área vegetada existente ao norte e em lotes sem ocupação. É visível pela análise de fotos de satélite que a percentagem de área da área construída é superior a vegetada existente no bairro (Figura 23). No entanto, percebe-se que a vegetação presente no bairro é superior a do Bairro Areão, bem como sua taxa construída é inferior à do Bairro Areão. O bairro se caracteriza por apresentar um extensa área desmatada (solo desnudo) ao norte e vários lotes não edificados ao sul, acompanhando o Córrego 8 de Abril. As Avenidas Miguel Sutil, Senador Metello e Avenida das Flores concentram quase todo o tráfego gerado dentro do bairro, sendo elas responsáveis pela disseminação de ruído e poluição de gases no ambiente urbano daquele bairro.

b) Entorno do Sítio 2

A Escola Estadual Prof. Ulisses Cuiabano está localizada nas proximidades da Av. das Flores (Via Principal), atrás do Hospital Jardim Cuiabá, na intersecção das ruas dos Miosótis e das Dálías (ruas locais) (Figura 24).

A presença do hospital na região corroborou para alterar o uso e ocupação dos lotes na Avenida das Flores, bem como nas ruas adjacentes a ela, o que de certa forma, contribuiu para modificar o entorno do Sítio 2. Assim, os lotes que eram tipicamente residenciais, tornaram-se comerciais em virtude da demanda de serviços existente na região. Sob o ponto de vista das construções existente no entorno da

escola, nota-se a noroeste e nordeste a presença de edificações de maior porte (Clínica Médica e Hospital Jardim Cuiabá) e gabarito, com altura superior a 8 metros de altura, o que dificulta a penetração de vento por essas direções.

As edificações a sudeste apresentam características de uso misto, ou seja, presença de edifícios residenciais intercalados por edifícios comerciais. Como as edificações são de menor porte e gabarito (inferior a 4 metros de altura), elas oferecem pouca resistência a penetração dos ventos por essa direção. Comportamento semelhante se observa a sudoeste, onde as edificações são tipicamente residenciais, e também de menor porte e baixo gabarito. Tanto à sudeste, sul e sudoeste, nota-se a existência de lotes não edificados, com presença de baixa vegetação. Ao norte, o Sítio 2 se interliga a Avenida das Flores, sofrendo bastante influência desta devido a presença de intensa movimentação de veículos. Devido à proximidade ao hospital, as Ruas dos Miosótis e das Dálías passaram a apresentar intensa circulação de veículos. Alguns estacionamentos foram instalados em lotes adjacentes a essas ruas para comportar o fluxo de veículos nessa região.



Figura 23– Entorno da Escola Estadual Ulisses Cuiabano – raio de 500 m
Fonte: Google Earth

c) Características da Escola Estadual Ulisses Cuiabano

A E. E. Prof. Ulisses Cuiabano foi edificada no início da década 80 e apresenta padrão arquitetônico e aspectos construtivos semelhantes à E. E. João Briene de Camargo. A escola ocupa o terreno de uma quadra do bairro Jardim Cuiabá e apresenta declividade bastante acentuada. Provavelmente em função da declividade do terreno, os blocos não foram instalados paralelamente nem às ruas dos Miosótis e das Dálías, e sim inclinadamente às mesmas. Em virtude da forma de implantação realizada, o acesso à escola encontra-se recuado em relação às ruas citadas, formando uma área destinada a estacionamento de veículos junto à entrada da escola (Figura 24).

A maior altitude observada é de 187 m junto à quadra poliesportiva localizada nos fundos da escola, enquanto a menor é registrada junto ao portão de acesso, com altitude de 182m. Devido ao declive existente, foram realizados alguns cortes no terreno para facilitar a implantação da escola.

Ao se adentrar na escola pelo portão principal, à esquerda, existe pátio cívico e estacionamento interno para veículos (Figura 25b). À direita, nota-se a existência de uma grande área não edificada, com presença de vegetação, com acesso restrito tanto para alunos como para professores. Mais a frente, observa-se os primeiros blocos de salas de aula, o pátio central e os taludes que foram criados com a finalidade de facilitar a implantação dos blocos da escola (Figura 25c).



Figura 24– Imagem de satélite da E. E. Prof. Ulisses Cuiabano

Fonte: Google Earth

Entre todos os blocos existe um espaço destinado à circulação e acesso às salas de aula pelos alunos e professores (Figura 25d). Nos fundos, à esquerda, nota-se a presença de um gramado destinado à prática de esportes, e a direita, quadra poliesportiva (Figura 25e). Com relação à pavimentação das superfícies, no estacionamento externo, adjacente às ruas dos Miosótis e das Dálias, verifica-se a presença de solo coberto com concreto junto ao passeio de acesso ao portão principal da escola e na via de acesso ao estacionamento interno da escola (Figura 25a e Figura 25b). As demais áreas externas estão desnudas, sem nenhum tipo de revestimento.

O estacionamento interno, o pátio cívico e o central estão todos revestidos por concreto (Figura 25b). Diferentemente do que acontece na Escola João Briene, os pátios de circulação estão impermeabilizados por concreto. No entorno da quadra poliesportiva, nos fundos da escola, não há presença de revestimento (solo descoberto), sendo que somente o campo de futebol é revestido por grama (Figura 25e).

A vegetação é abundante e rica diversidade de espécies arbóreas e localizam-se principalmente nas áreas periféricas, contornando todo o perímetro da escola e no pátio central (Figura 24). Devido à altura das árvores, a rugosidade é alta, dificultado a penetração de vento dentro das áreas edificadas. Nota-se a presença de vegetação nas áreas internas aos blocos somente no pátio central (Figura 25d).

A área total do terreno da escola é de aproximadamente 11.310 m^2 , sendo que 1.865 m^2 deste estão edificados. A área impermeabilizada é de aproximadamente 4.038 m^2 , ou seja, 35,69% da área total. A projeção de massa vegetada sobre a superfície do solo é de aproximadamente 3.912 m^2 , 34,58% da área do terreno, aproximadamente 5 vezes maior que a projeção de massa vegetada Escola Estadual João Briene de Camargo e 3,4 vezes maior que a da Escola Estadual André Avelino Ribeiro que será descrita na sequência.



Figura 25– Fotos da escola: a) Região de acesso à escola, b) estacionamento e pátio cívico, c) pátio central, d) pátios de circulação e) campo e quadra poliesportiva

4.2.1.3 Sítio 3 – Escola Estadual André Avelino Ribeiro

a) Bairro Morada da Serra

O bairro Morada da Serra está localizado na região Norte, a uma distância de aproximadamente 6,78 km do centro da cidade. Foi criado em 1997, a partir dos loteamentos CPA 1, 2 e 3. Possui área de 743,80 ha e população de 59.535 habitantes, o que lhe confere uma densidade populacional de 76,50 hab/ha, sendo o mais populoso dos três bairros apresentados. O bairro possui topografia também acentuada, sendo que menor altitude observada é de 180 m na intersecção da Av. dos Trabalhadores com o Córrego Gunitá, e a maior, nas proximidades do Sítio 3, com

246 m, na Av. Historiador Rubens de Mendonça intersecção com a rua Marzagão. O bairro apresenta 14.689 domicílios e a grande maioria da população reside em casas, o que caracteriza o bairro como tipicamente residencial. Similar ao que acontece no bairro Areão, as edificações residenciais apresentam tipologia característica composta por paredes de alvenaria e telhados de telha cerâmica.

As edificações comerciais se concentram junto aos principais corredores de tráficos do bairro: Av. Historiador Rubens de Mendonça (ao norte), Av. dos Trabalhadores (ao sul), rua Dr. Ulisses Guimarães, Av. Brasil, rua Pernambuco, rua Bahia, rua Prof^a. Alice Freire Silva e Av. Dr. João M. de Barros, sendo que as últimas estão inseridas dentro do bairro. Essas edificações muitas vezes possuem mais de um pavimento o que faz com o gabarito destas edificações exceda o gabarito médio das edificações residenciais, que é de aproximadamente 3 a 4 metros de altura.



Figura 26 – Entorno da Escola Estadual André Avelino Ribeiro – raio de 500m
Fonte: Google Earth

O Bairro possui o Parque Municipal Lagoa Encantada inaugurado em 2010. No entanto, apresenta pouca massa vegetada no seu entorno. A vegetação existente no bairro se localiza principalmente nos fundos e nas frentes dos lotes residenciais, em uma grande área vegetada nas proximidades da região central do bairro, nos lotes

sem ocupação e em praças. É visível através de fotos de satélite que a o bairro apresenta baixa percentagem de área vegetada e alta taxa construída (Figura 26). Nota-se a presença de poucos lotes não edificados na região. As avenidas que concentram a maior parte do comércio da região concentram quase todo o tráfego gerado dentro do bairro, sendo elas responsáveis pela disseminação de ruído e poluição de gases no ambiente urbano.

b) Entorno do Sítio 3

A Escola Estadual André Avelino Ribeiro está localizada na Avenida Joinville (Via Principal), na intersecção das ruas Alenquer e Obdos (ruas locais), no Conjunto Habitacional do CPA 1 (Figura 26). Destinado a população de baixa renda, o CPA 1 é um loteamento tipicamente residencial, com edificações de baixo gabarito (3 a 4 metros de altura). Exceção a essa regra são as edificações que estão localizadas junto às avenidas comerciais, com gabarito de maior porte, de 4 a 6 metros de altura. O Sítio 3 está localizado nas proximidades da praça do CPA 1 (sudoeste) que apresenta grande área com presença de vegetação, alta permeabilidade do solo, e baixa porcentagem de área edificada. Nessa praça, constata-se a presença do centro comunitário, duas quadras poliesportivas e um campo de futebol (70x100 m).



Figura 27– Imagem de satélite da E. E. André Avelino Ribeiro
Fonte: Google Earth

Adjacente a praça (sudoeste), constata-se a presença do terminal de ônibus do CPA 1. O entorno da praça, do terminal e algumas quadras a sudoeste concentram grande parte do comércio existente na região, o que confere a esta região alta rugosidade superficial (Figura 26). A nordeste, sul, sudeste do Sítio 3, nota-se que as edificações são térreas, com baixo gabarito (inferior a 4 metros de altura), o que faz com que a região apresente baixa rugosidade superficial, oferecendo baixa resistência a penetração dos ventos. Exceção se faz a noroeste, direção em que as edificações são comerciais (presença de supermercado e policlínica da região) e de maior porte.

Existem poucos lotes residenciais não edificados no entorno. Exceção são a praça e uma grande área localizada ao sul (antigo centro esportivo da região). A noroeste, junto a Avenida Historiador Rubens de Mendonça, existe uma praça com presença de Ginásio Poliesportivo, empresas prestadoras de serviços e centros recreativos. Tanto ao norte quanto a noroeste, existem grande áreas desnudas na região. A noroeste, localiza-se uma grande área de preservação permanente com grande massa vegetada. A Avenida Historiador Rubens de Mendonça é a principal via de acesso ao bairro. Os veículos adentram o bairro pela rua Alenquer e o deixam pela rua do Obdos, o que faz com que estas ruas funcionem como ruas coletoras dentro o bairro, fazendo com que o sítio esteja sob intensa movimentação de veículos.

c) Características da Escola Estadual André Avelino Ribeiro

A E. E. André Avelino Ribeiro foi edificada no início da década 80 e apresenta padrão arquitetônico e aspectos construtivos semelhantes a E. E. João Briene de Camargo e Ulisses Cuiabano. A escola ocupa aproximadamente a metade de uma quadra no loteamento CPA 1. Diferentemente do que acontece nas outras escolas, a escola André Avelino não se encontra recuada em relação à Av. Joinville, não havendo desta forma, área externa frontal à escola destinada a estacionamento de veículos, como observado nas escolas anteriormente descritas (Figura 27).

A maior altitude observada é de 238 m junto às quadras poliesportivas localizada nos fundos da escola, enquanto a menor é registrada junto ao portão frontal de acesso, com altitude de 235 m (Figura 28a). Ao se adentrar na escola por este portão, à esquerda, existe pátio cívico e estacionamento interno para veículos (Figura 28b). À direita, nota-se a existência de uma grande área não edificada, com

presença de arborização (Figura 28c). Mais a frente, observa-se os primeiros blocos de salas de aula e o pátio central da escola (Figura 28d). Entre todos os blocos existe um espaço destinado à circulação e acesso às salas de aula como observado nas escolas descritas anteriormente (Figura 28e). Nos fundos, à esquerda, nota-se a existência de uma quadra poliesportiva coberta, no centro uma quadra poliesportiva descoberta e a esquerda, bloco com salas de aula para informática, recém-construído (Figura 27).

As superfícies pavimentadas são compostas por revestimento de concreto no passeio de acesso a escola junto ao portão principal quanto no estacionamento interno, o pátio cívico e central (Figuras 28b e Figura 28e). Com relação aos pátios de circulação, verifica-se que entre os primeiros blocos, eles estão impermeabilizados com concreto. Entre os blocos dos fundos, eles estão descobertos sem nenhum tipo de revestimento (solo nu). No entorno das quadras poliesportivas localizadas nos fundos da escola não há presença de revestimento e o solo se encontra descoberto. A vegetação está presente no interior do sítio e ela se localiza principalmente em áreas periféricas, contornando todo o perímetro da escola (Figura 27). Não há presença de vegetação no pátio central, somente no pátio cívico e em alguns pontos dos pátios de circulação.

A área total do terreno da escola é de aproximadamente 11.455 m^2 , sendo que destes 3.403 m^2 estão edificadas. A área impermeabilizada é de aproximadamente 6.260 m^2 , ou seja, 54,64% da área total. A projeção de massa vegetada sobre a superfície do solo é de aproximadamente 1.150 m^2 , o que corresponde a aproximadamente 10,03% da área do terreno, 1,5 vezes maior que a existente na Escola Estadual João Briene de Camargo e 3,4 vezes inferior que a da Escola Estadual Ulisses Cuiabano.



Figura 28 – Fotos da escola: a) Região frontal da escola, b) Estacionamento e Pátio Cívico, c) Área de recuo frontal da escola, d) Pátio Central, e) Pátio de Circulação

4.2.2 Avaliação Morfologia do entorno dos sítios

Com intuito de subsidiar a análise do microclimas dos sítios pesquisados, bem como a avaliação do calor armazenado dentro do dossel urbano, levantou-se a descrição da terra em termos de fração de área, bem como o uso e ocupação do solo no entorno dos sítios estudados. Esta avaliação foi feita pelo modelo estático de área de contribuição (“footprint”) através de imagens de satélite de alta resolução espacial a partir de um círculo de influência para os sensores de temperatura e umidade com raio de 500 m, conforme sugerido por Oke (2006). Desta forma, admitiu-se a resposta do modelo de armazenamento de energia dentro do dossel urbano e que os

fluxos turbulentos de calor sensível e latente avaliados a partir dos termos higrômetros ficaram influenciados pelas características morfológicas do entorno dos sítios por um raio de extensão máxima de 500 m.

As imagens de alta resolução espacial disponibilizadas pela ferramenta computacional Google Earth (GOOGLE, 2010) com um raio de 500 m no entorno dos sítios foram importadas para um programa CAD onde através de interpretação visual foram quantificadas em áreas de vegetação, solo total e parcialmente descoberto (nu), asfalto, concreto, de telhado e cânions urbanos. Cada sítio foi caracterizado em termos de: área plana de vegetação (árvores, grama, arbustos, etc), área plana permeável (solo desnudo e parcialmente desnudo), área plana impermeável (cimento/ asfalto/ brita, estacionamentos, ruas, calçadas com exceção dos edifícios) e áreas de superfícies tridimensionais dos edifícios, subdivididas em área de telhados e paredes. Assim, a área total de superfícies ativas (A_S) em contato com a atmosfera no entorno dos sítios foi definida de acordo com a equação:

$$A_S = A_V + A_I + A_P + A_T + A_C \quad \text{Equação 31}$$

em que A_V é a área plana vegetada, A_I é a área plana impermeável (concreto e asfalto), A_P é a área plana permeável (solo desnudo e parcialmente coberto), A_T é a área dos telhados dos edifícios e A_C é a áreas das paredes (avaliada a partir dos cânions urbanos). É possível obter a medida da morfologia tridimensional dos sítios em função da divisão da área plana total (A_{Plana}) pela área total de superfícies ativas (A_S) dentro da área do círculo adotado. Esta propriedade de sítio urbano é importante, pois permite caracterizar a capacidade do dossel urbano em armazenar energia.

Como forma de completar a descrição do entorno de cada um dos sítios urbanos, além das informações de uso e ocupação do solo, caracterizou-se a rugosidade, bem como estrutura do tecido urbano onde as estações meteorológicas foram instaladas. A rugosidade superficial foi caracterizada preliminarmente a partir do uso da Tabela 5. Posteriormente, a análise morfométrica urbana proposta por Macdonald et al. (1998) foi empregada forma que se pudesse obter valores mais precisos para o comprimento de rugosidade da superfície (z_0) e o deslocamento do plano zero (z_d), visto que estes parâmetros descrevem a influência da morfometria urbana no fluxo de ar dentro dos ambientes urbanos. Na Figura 29 são retratados de forma simplificada as características médias das dimensões, dos espaçamentos e da

área total do arranjo espacial urbano genérico de tal forma que este possa ser utilizado para avaliar os índices adimensionais empregados na avaliação de z_0 e z_d :

$$A_T = (L_x \cdot L_y) / (D_x \cdot D_y) \quad \text{Equação 32}$$

$$\lambda_F = A_F / A_T = z_H L_y / D_x D_y \quad \text{Equação 33}$$

em que \bar{L}_x , \bar{L}_y e \bar{z}_H representam as dimensões de largura, comprimento e altura média dos edifícios, \bar{W}_x e \bar{W}_y o espaçamento transversal e longitudinal, \bar{D}_x é a soma de \bar{L}_x e \bar{W}_x e \bar{D}_y a soma de \bar{L}_y e \bar{W}_y , \bar{A}_T a área total do arranjo espacial, \bar{A}_P a área plana do edifício e \bar{A}_F a área frontal do edifício na direção perpendicular ao fluxo de vento. Embora o desenho apresentado na Figura 29 seja genérico, ele procura representar todos os obstáculos relevantes para o fluxo de ar dentro do arranjo espacial urbano. O termo \bar{u} representa a velocidade média do vento, z_H a altura média dos obstáculos rugosos existentes dentro do arranjo espacial urbano em estudo e z_r a altura da Subcamada Rugosa ou Camada de Mistura.

A estrutura do tecido foi avaliada a partir da classe de rugosidade definida na Tabela 5, das proporções médias dos cânions urbanos observados no entorno dos sítios urbanos (\bar{z}_H/W) e pela porcentagem de área impermeabilizada calculada a partir do levantamento do uso e ocupação do solo. Estas informações subsidiaram a classificação dos sítios em termos de zonas climáticas urbanas (ZCU) conforme metodologia proposta por Oke (2006). A Tabela 6 proposta pelo autor reúne um conjunto simplificado de classes que inclui aspectos dos sistemas urbanos definidos por Auer (1978) e Ellefsen (1991), além das medidas físicas relacionadas ao vento e controles térmicos e de umidade.

É importante destacar que a proporção definida por \bar{z}_H/W é avaliada a partir da média das alturas dos principais elementos rugosos (prédios, árvores) dividido pelo seu espaçamento médio entre estes elementos. Esta grandeza está diretamente relacionado aos tipos de regime de fluxo de ar nesses ambientes e aos controles térmicos (proteção solar e aprisionamento de onda longa). A presença de árvores altas aumenta significativamente esta variável. A “% construída” apresentada na Tabela 6 é uma relação entre as áreas impermeáveis (área de edifícios, ruas, pavimentos e outras áreas impermeáveis) e a área total das classes definidas no uso e ocupação do solo no entorno do sítio (espaço verde, água, solo total ou parcialmente descoberto e outras superfícies naturais).

Tabela 5 – Classificação preliminar da rugosidade do terreno proposta por Davenport et al. (2000). z_0 representa o comprimento de rugosidade e z_d o deslocamento do plano zero e z_H a altura média dos edifícios no local em análise

Classe	z_0 (m)	Descrição da superfície urbana
4 “Ligeiramente rugoso”	0,10	Cidades com obstáculos espaçados tais como edifícios baixos isolados ou árvores com relativo espaçamento horizontal (pelo menos 20 vezes a altura dos edifícios ou árvores).
5 “rugoso”	0,25	Obstáculos escalonados com relativas distâncias entre si (8 a 12 vezes a altura dos objetos sólidos -edifícios e árvores) – A análise pode requerer avaliação de z_d
6 “Muito rugoso”	0,5	Área moderadamente coberta por edifícios baixos com relativa separação entre os obstáculos (de 3 a 7 vezes a altura) – A análise pode requerer avaliação de z_d
7 “Escumante”	1,0	Área densamente construída sem muita variação nas alturas dos edifícios – A análise pode requerer avaliação de z_d
8 “Caótico”	2,0	Centro das cidades com existência de edifícios baixos e elevados – análise de túnel de vento requerida

¹ Para as classes de 1 a 3 e classes rurais de 4 a 8, consultar a Parte I, cap. 5 de Aguilar et al. (2003).

² Valores preliminares de z_d são dadas como frações de altura média dos obstáculos presentes no local, a saber: $0,5 z_H$, $0,6 z_H$ e $0,7 z_H$ para as categorias de Davenport et al. (2000) 5, 6 e 7, respectivamente.

Fonte: Adaptado de Oke (2006)

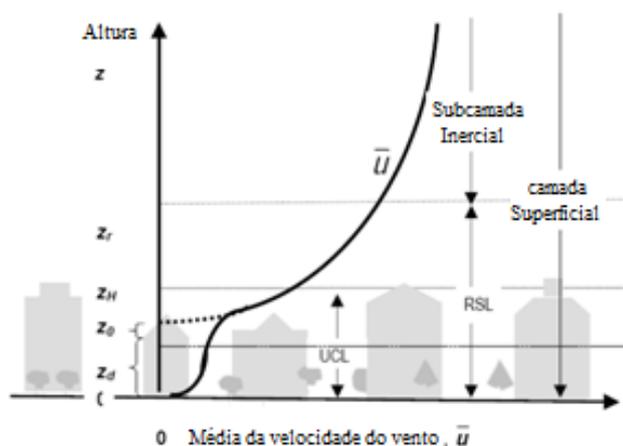
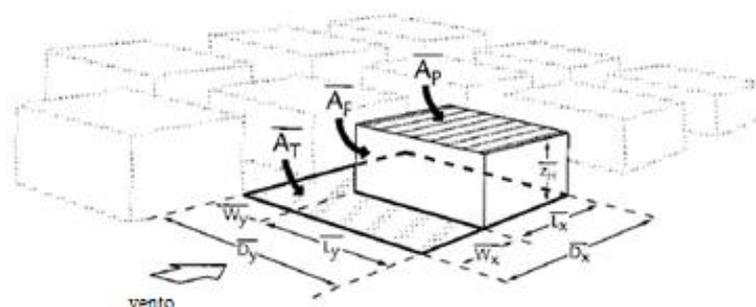


Figura 29 – Definição das dimensões superficiais utilizadas na análise morfométrica dos parâmetros z_0 e z_d proposto por Macdonald et al. (1998)

Fonte: Adaptado de Grimmond e Oke (1999)

Como forma de caracterizar a arborização presente dentro da cada sítio urbano, realizou-se um inventário arbóreo onde foram identificadas e contadas as espécies arbóreas existentes em cada sítio. Esse inventário forneceu subsídios para caracterizar a morfologia dos indivíduos arbóreos presentes em cada sítio. Com tal fim, os seguintes dados foram levantados conforme metodologia proposta por Oliveira et al. (2011): localização das espécies, nomes comuns e científicos, origem, altura das árvores, das copas e fustes, diâmetros das copas e índice de área foliar. A partir deles, foi realizado o enquadramento das árvores com relação ao seu porte, segundo classificação sugerida por Mascaró e Mascaró (2005).

Com vistas a estudar a estrutura e as condições da arborização nos sítios, utilizou-se dois índices espaciais propostos por Simões et al. (2001): o Índice de Sombreamento Arbóreo (ISA) e o Índice de Densidade Arbóreo (IDA).

O primeiro representa o percentual de área sombreada em relação à área total e é calculado de acordo com a equação:

$$ISA = \frac{\text{Área}_{\text{sombreada}}}{\text{Área}_{\text{Total}}} \quad \text{Equação 34}$$

em que $\text{Área}_{\text{sombreada}}$ representa a projeção ortogonal das copas sob a superfície do terreno e $\text{Área}_{\text{total}}$ a área total do sítio em estudo.

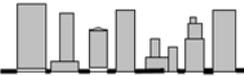
O segundo índice representa o número de árvores existentes em cada 100 m² sendo avaliado pela equação:

$$IDA = \frac{N_{\text{árvores}}}{\text{Área}_{\text{Total}}} \quad \text{Equação 35}$$

em que $N_{\text{árvores}}$ é o número de árvores presentes no sítio e $\text{Área}_{\text{Total}}$ é a área total do sítio em estudo.

Simões et al. (2001) destacam que em bairros com predomínio de atividades comerciais e residenciais, o ISA deve ser superior 30% e 50%, respectivamente. De forma complementar, recomenda-se para o índice IDA que haja pelo menos 1 indivíduo arbóreo a cada 100 m² (LIMA NETO e SOUZA, 2009).

Tabela 6 – Classificação simplificada das Zonas Climáticas Urbanas (ZCU) de acordo com Oke (2006)

Zona Climática Urbana (UCZ) ¹	Imagem	Classe de Rugosidade ²	\bar{z}_H/W (Cânion)	%construída
1.Intenso desenvolvimento urbano com destacada proximidade de edifícios altos e alta taxa de impermeabilização. Ex.: Regiões centrais das cidades.		8	> 2	> 90
2.Intenso desenvolvimento urbano com elevada densidade construída com edifícios de 2 a 5 pavimentos com elevada proximidade e ruas impermeabilizadas por pedras ou tijolos. Ex. Centro antigo das cidades		7	1-2,5	> 85
3.Intenso desenvolvimento e média densidade urbana com destacada proximidade entre as casas, lojas /apartamentos. Ex. Bairros residenciais		7	0,5-1,5	70-85
4.Intenso desenvolvimento e baixa ou média densidade urbana com grande quantidade de edifícios baixos e presença de estacionamentos. Ex. Shopping centers, armazéns, área industriais etc.		5	0,005-0,2	70-95
5.Médio desenvolvimento e baixa densidade urbana e presença de edifício com 1 ou 2 pavimentos. Ex.: Subúrbio.		6	0,2-0,6 > 1 com árvores	35-65
6. Uso misto com grande quantidade de edifícios em áreas com baixa densidade construída. Ex.: Instituições tais como hospitais/ universidades/ aeroportos.		5	0,1-0,5 Depende das árvores existentes	< 40
7.Área quase rurais, com edifícios espaçados próximos a regiões naturais /com agricultura. Ex.: sítios, pequenas propriedades agrícolas.		4	> 0,05 Depende das árvores existentes	< 10

1 Correspondência aproximada entre ZCU e zonas de terreno definidas por Ellefsen: 1 (Dc1, DC8), 2 (A1-A4, Dc2), 3 (A5, Dc3-5, DO2), 4 (DO1, DO4, DO5), 5 (DO3), 6 (Do6), 7 (nenhuma).

2 Rugosidade do terreno de acordo com a classificação Davenport (Davenport et al, 2000.); (Tabela 6)

Fonte: Adaptado de Oke (2006)

4.2.3 Avaliação do Calor Antropogênico (Q_F)

Devido à maior facilidade de obtenção dos dados, o Método do Inventário foi utilizado para estimar o fluxo de calor antropogênico dissipado no meio urbano. É importante destacar que as tabelas e gráficos apresentados a seguir foram confeccionados a partir de dados fornecidos por alguns pesquisadores e agências reguladoras estaduais e federais com intuito de estimar o calor antropogênico nos três sítios pesquisados.

4.2.3.1 Calor Antropogênico liberado pelas Fontes Veiculares (Q_{FV})

Os principais parâmetros necessários para avaliar o calor liberado pelas fontes veiculares são a distância média percorrida pelos veículos ($pcDVD$), a composição da energia liberada pela queima de combustíveis pelos veículos (EV_{comb}), a fração de tráfego (F_t) e a densidade de população horária ($\rho_{pop}(h)$).

A $pcDVD$ é expressa em $\text{km pessoa}^{-1}\text{dia}^{-1}$ e foi assumida ter pequena variação sazonal neste trabalho. Para estimar o valor de $pcDVD$ foram utilizadas as seguintes informações: dados de consumo anual de gasolina, álcool hidratado e diesel, frota de veículos de Cuiabá, Fator de Economia (consumo urbano) para gasolina, álcool hidratado e diesel, disponibilizados em INMETRO (2011) e Borba (2008). O modelo empregado na estimativa $pcDVD$ foi o “Top-Down”, onde a estimativa é feita a partir do consumo global anual de combustível.

A partir dos dados anuais de consumo de combustíveis, calculou-se a distância média diária (DMD) percorrida pelos veículos a gasolina, álcool hidratado e diesel. De posse da fração da frota de cada tipo de veículo, avaliou-se a distância média diária ponderada ($DMDP$) para todos os tipos de veículos da frota de Cuiabá durante o ano de 2010. A distância média percorrida por veículo por pessoa por dia ($pcDVD$) foi obtida dividindo-se a distância média percorrida pelos veículos pelo fator de capacidade médio diário ($FCMD$), que representa a quantidade média de pessoas transportada por veículo.

O fator de capacidade médio horário ($FCMH$) foi obtido pelo produto da fração de tráfego pelo fator de capacidade (FC) adotado para cada veículo: 1,5 para veículos leves, 1,0 para motos, 2,0 para caminhonetes, 12 para vans, 2,0 para caminhões e 40 para ônibus, valores estes sugeridos por Borba (2008). O fator de

capacidade médio diário (*FCMD*) foi obtido pela média do fator de capacidade horário (*FCMH*). Os resultados encontrados podem ser visualizados na Tabela 7 e foram utilizados para estimar o fluxo de calor antropogênico liberado pelos veículos na cidade de Cuiabá-MT. Os dados de consumo anual dos combustíveis foram disponibilizados pela Agencia Nacional de Petróleo (ANP, 2011). A frota de veículos foi obtida no Departamento Estadual de Transito de Mato Grosso (DETRAN, 2011) e o fator de economia (*FE*) foi avaliado a partir do trabalho desenvolvido pelo INMETRO (2011), para gasolina e álcool hidratado, e para veículos a diesel em Borba (2008).

Para simplificação dos cálculos, considerou-se que os carros movidos a Gasolina-GNV e Álcool-GNV estivessem utilizando gasolina e álcool hidratado, respectivamente. Os dados de consumo de combustíveis foram atualizados a partir da taxa média de crescimento anual de consumo para o estado de Mato Grosso que foi de 5,67% para o Álcool hidratado, 10,94% para a Gasolina tipo C e 7,01% para o Diesel (ANP, 2011) visto que os dados disponibilizados pela ANP (2011) e Balanço Energético do Estado do Mato Grosso - BEEMT (SICME, 2010) se referem ao consumo de combustíveis durante o ano de 2009.

A estimativa do *EV* (energia liberada pela queima de combustíveis pelos veículos em função da distância percorrida) foi realizada por meio dos valores NHC_{comb} e ρ_{comp} apresentados por Ferreira (2010). Os fatores de economia (*FE*) para cada tipo de veículo foram obtidos a partir dos dados disponibilizados pelo INMETRO (2011) e por Borba (2008), visto que estes apresentam valores mais realísticos para o consumo de combustíveis para o meio urbano do que aqueles apresentados por Ferreira (2010). Os valores de a_{comb} utilizados por Ferreira (2010) se referem à porcentagem de cada tipo de veículo cadastrado no DETRAN de São Paulo-SP. No presente trabalho, estes valores foram substituídos pela fração horária de cada tipo de veículo que estava circulando naquela hora. Estas frações horárias foram disponibilizadas pela curva média obtida pela contagem do Tráfego Médio Diário (*TMD*) realizado por Miranda (2010) nas imediações dos sítios pesquisados. A partir dessas informações, foi possível estimar para cada tipo de combustível e veículo, a energia liberada por metro linear percorrido (EV_{comb}) pelas fontes veiculares na cidade de Cuiabá-MT (Tabela 7 e 8).

Tabela 7 – Dados para avaliação da distância média percorrida pelos veículos. *FE* é o fator de economia, *DMD* a distância média diária, *FC* o fator de capacidade e *DMDP* a distância média diária ponderada

Ano 2010	FE (km l ⁻¹)	DMD (m dia ⁻¹)	FC (pessoa veículo ⁻¹) ³	Fração de Veículos ⁵	DMDP (km/dia) ⁶
Veículos a gasolina	10,3 ¹	25.738	1,5	33,3%	8,56
Veículos a álcool	7,2 ¹	28.510	1,5	36,8%	10,52
Motos a gasolina	25,0 ²	25.000 ³	1,0	20,5%	5,12
Ônibus, Caminhões, Vans e Caminhonetes a diesel	4,0 ³	90.402	40, 2,0, 12 e 2,0, respectivamente	9,4%	8,49
FCMD = 1,75 ⁴					32,707
1 Média dos valores disponibilizados em INMETRO (2011).					pcDVD = 18,69 (km pessoa ⁻¹ dia ⁻¹)
2 Valor sugerido em Borba (2008)					
3 Valor sugerido em Borba (2008)					
4 Valor do fator de capacidade médio diário (FCMD) foi obtido pela média do fator de capacidade médio horário (FCMH), que foi obtido pelo produto da fração horária de cada veículo pelo fator de capacidade de cada veículo dividido pela fração horária total de veículos					
5 Valores obtidos da frota de veículos disponibilizados pelo DETRAN (2011)					
6 Produto da distância média diária pela fração de cada tipo de veículo					

Tabela 8 – Energia liberada pelos veículos em função da distância percorrida. a_{comb} é a fração horária de cada tipo de veículo, NHC_{comb} o calor líquido liberado pelo consumo de cada tipo de combustível, ρ_{comp} densidade de cada tipo de combustível, *FE* o fator de economia para cada tipo de veículo e EV_{comb} a energia liberada pelos veículos em função da distancia

Combustível	a_{comb} ¹ (%)	NHC ² (MJ kg ⁻¹)	ρ_{comp} (kg/m ³)	FE (m l ⁻¹)	EV_{comb} (J m ⁻¹)
Gasolina	Variável	44,1	738	10.340 ³	3.147 ⁵
Álcool hidratado	Variável	24,9	738	7.210 ³	2.548
Gasolina (motocicletas)	Variável	44,1	738	25.000 ⁴	1.301
Óleo Diesel	Variável	42,6	851	4.000 ⁴	9.063
1 Fração horária de cada tipo de veículo que está circulando por hora obtida a partir do trabalho de Miranda (2010).					
2 Calor liberado pelo consumo de cada tipo de combustível. Valores utilizados por Ferreira (2010)					
3 Valores médios estimados a partir de INMETRO (2011)					

4 Valores sugeridos por Borba (2008)

5 Valores calculados utilizando a expressão $EV_{comb} = (NHC_{comb} \cdot \rho_{comb}) / FE$

A fração de tráfego horária ($F_t(h)$) é a razão entre o número total de veículos em movimento para um determinado horário e o número total de veículos em movimento durante o dia (FERREIRA, 2010). Ela é obtida a partir da contagem de tráfego classificatória ao longo de um dia completo (Tráfego Médio Diário - TMD). Para que ela seja representativa, é conveniente que ela seja feita em vários pontos de uma avenida, assim como em vários períodos do ano. A fração de tráfego ($F_t(h)$) utilizada neste trabalho foi obtida a partir do trabalho Miranda (2010) que durante o ano de 2009 realizou medições de fluxos de veículos nas principais avenidas da cidade de Cuiabá: Av. Miguel Sutil, Av. Fernando Correa da Costa e Av. Historiador Rubens de Mendonça.

Como as áreas em estudo estão localizadas muito próximas das Av. Miguel Sutil e Historiador Rubens de Mendonça, utilizou-se os dados de contagem de tráfego destas avenidas para estimar do fluxo de calor antropogênico liberado pelas fontes veiculares. Na Figura 30 são apresentadas as variações diárias da fração de tráfego nas proximidades dos Sítios 1, 2 e 3 para o ano de 2009 obtido a partir do trabalho de Miranda (2010).

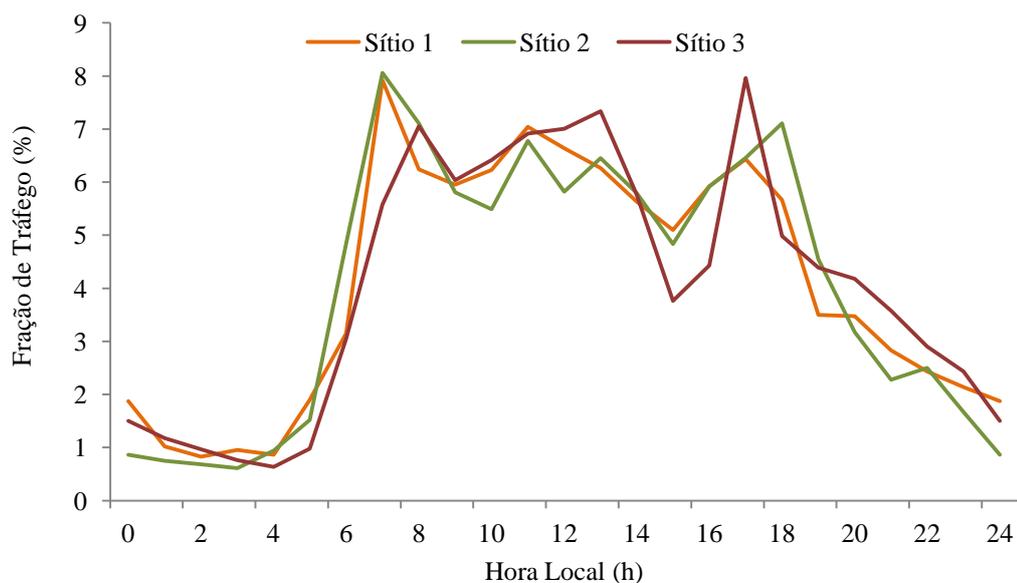


Figura 30 – Variação diária dos valores horários da fração de tráfego de veículos em movimento nas avenidas próximas aos Sítios 1, 2 e 3

Fonte: Adaptado de Miranda (2010)

Na avaliação da densidade de população horária $\rho_{pop}(h)$ torna-se necessário avaliar *NWRP* e *WP*, que nada mais são do que as pessoas residentes e não residentes na cidade núcleo. *NWRP* foi admitida ser a população residente na cidade de Cuiabá e *WP* foi representada pelo movimento pendular da população que ocorre na cidade. *NWRP* foi avaliada a partir do censo demográfico realizado na cidade no ano de 2010 (IBGE, 2010) enquanto na estimativa de *WP*, considerou-se que o deslocamento para trabalho e estudo (movimento pendular) na cidade de Cuiabá acompanhe a taxa de deslocamento do estado de Mato Grosso, igual a 65% da população residente (IBGE, 2000). Na avaliação da densidade de população, considerou-se que a população de Cuiabá (*NWRP*) fosse igual a 551.310 habitantes, movimento pendular na cidade (*WP*) de 358.352 pessoas e a superfície urbanizada de 132,37 km², avaliada a partir da taxa de impermeabilização do solo dentro do aglomerado urbano formado pelas cidades de Cuiabá e Várzea Grande que é de 52% (CALLEJAS et al., 2011a). A partir destes dados, e fazendo uso da Equação 7, foi possível avaliar a variação populacional diurna da cidade de Cuiabá em 2010-2011. Desta forma, no período noturno (antes das 5h e após as 19h), a densidade populacional da cidade foi admitida igual a 0,0042 habitante m⁻² e no período diurno (das 7h às 17h), igual a 0,0069 habitante m⁻². A densidade populacional durante os períodos de transição (noite-dia e dia-noite) foi admitida ser igual a 0,0055 habitante m⁻². A variação diária da densidade população adotada nos Sítios 1, 2 e 3 pode ser visualizada na Figura 31.

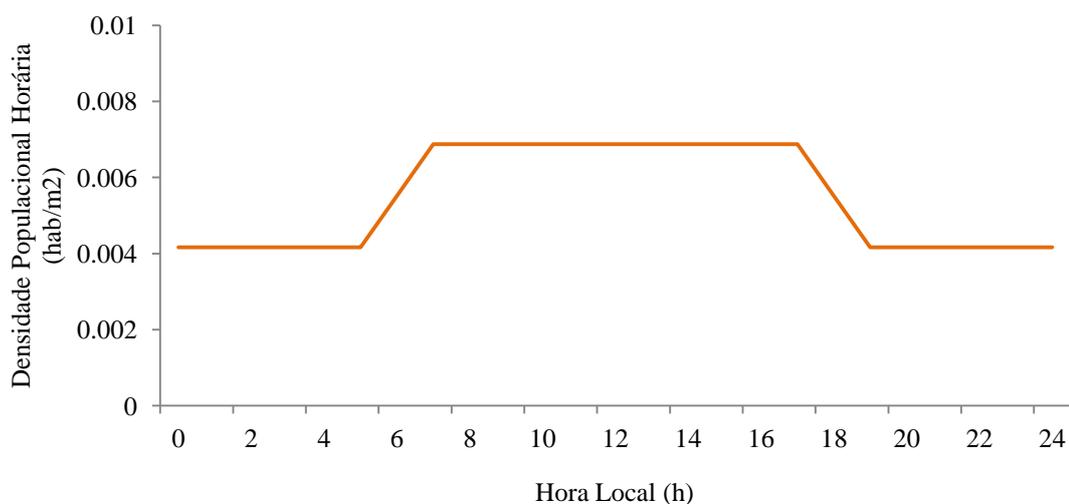


Figura 31 – Variação diária da densidade populacional para os sítios pesquisados.

4.2.3.2 Calor Antropogênico Liberado pelas Fontes Estacionárias (Q_{FS})

a) Dissipação de Energia pelo Consumo de Eletricidade (Q_{FSE})

Na avaliação da energia dissipada pelo consumo de eletricidade foi necessário ter disponível o consumo mensal de eletricidade (NHC_{electr}) e a fração horária do consumo diário de eletricidade pelas fontes estacionárias ($f(h)$) para a cidade de Cuiabá-MT. O consumo de eletricidade mensal e as curvas de carga dos meses de menor e maior consumo de eletricidade em cada sítio estudado foram disponibilizados pela Centrais Elétricas Matogrossenses (CEMAT, 2010). As frações horárias do consumo diário de eletricidade foram avaliadas a partir dos dados das curvas de cargas disponibilizadas. A título de exemplificação, apresenta-se a variação diária da fração horária de consumo de eletricidade para a cidade de Cuiabá-MT nos meses de menor (agosto) e maior consumo (outubro) (Figura 32). Para os outros meses, as curvas de fração horária de consumo de eletricidade foram obtidas por interpolação linear entre as curvas de menor e maior consumo de energia. O consumo diário foi assumido ser igual em todos os dias do mês, visto que os dados disponibilizados se referem ao consumo mensal para todos os meses do ano na cidade de Cuiabá-MT.

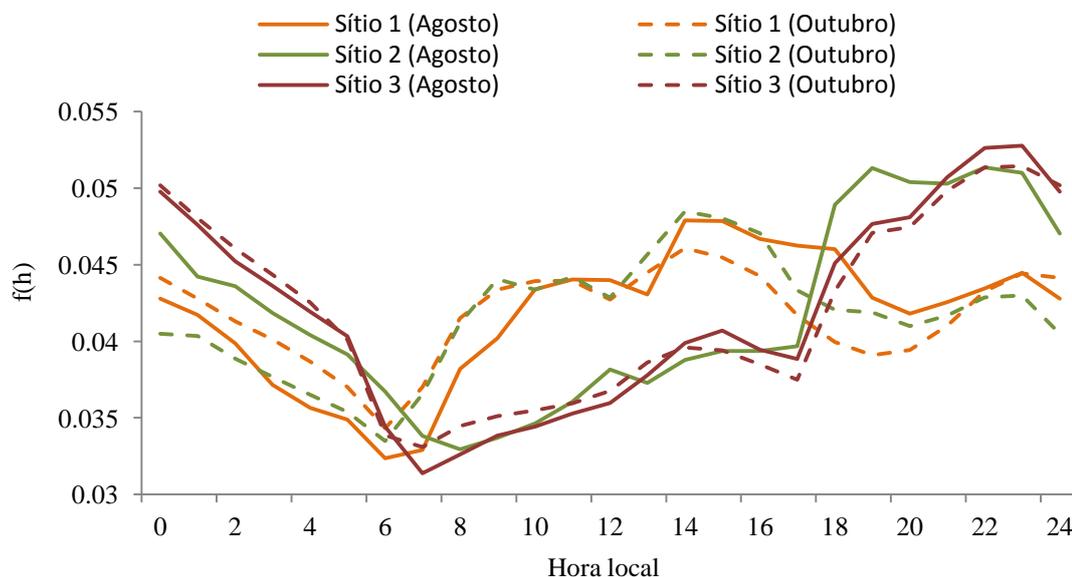


Figura 32 – Variação diária da fração horária de consumo de eletricidade para os meses de agosto (menor consumo) e outubro (maior consumo) na cidade de Cuiabá
Fonte: Avaliado a partir dos dados fornecidos pela CEMAT (2010)

b) Dissipação de Energia pelo Consumo de combustíveis - fontes estacionárias (Q_{FSF})

A dissipação de energia pelo consumo de combustíveis está relacionada ao uso do gás natural, GLP e óleo combustível. Nas áreas pesquisadas, tipicamente comerciais e residenciais, considerou-se no cômputo desta parcela apenas o uso de GLP e óleo combustível como fontes dissipadoras de calor. Os valores horários de consumo de combustíveis pelas fontes estacionárias não estão disponíveis em nenhuma bibliografia especializada consultada. Assim, a fração horária $g(h)$ foi admitida ser constante ao longo do dia e igual a 0,0417 (1/24h) em Cuiabá-MT.

O consumo diário, obtido através do consumo anual disponibilizado no Balanço Energético do Estado de Mato Grosso (SICME, 2010), foi considerado igual em todos os dias do ano. Considerou-se que cada quilo de GLP e óleo combustível dissipasse no meio ambiente energia equivalente a 45.000W e 42.600W, respectivamente. Para atualizar os dados de consumo destes combustíveis, utilizou-se taxa média de crescimento anual de consumo do estado de Mato Grosso de 5,39% tanto para o GLP quanto para o óleo combustível (ANP, 2011), visto que os dados disponibilizados em SICME (2010) se referem ao consumo de combustíveis durante o ano de 2009.

4.2.4 Calor Antropogênico liberado pelo Metabolismo Humano (Q_{FM})

Para avaliar o calor liberado pelo metabolismo humano foi necessário definir a taxa metabólica diária desempenhada pelas pessoas, bem como a densidade populacional presente no entorno (bairro) dos sítios urbanos pesquisados.

Para avaliação do calor antropogênico metabólico dissipado pela população da cidade de Cuiabá, admitiu-se que entre as 23h e 5h, as pessoas estivessem descansando (dormindo) e apresentassem desta forma taxa metabólica de 75 W. Durante o período de maior atividade, entre 7h e 21h, a taxa metabólica foi assumida ser igual 150 W (trabalho leve). Os períodos de transição foram definidos de forma subjetiva entre 5h e 7h e entre 21h e 23h, sendo que taxa metabólica foi estimada interpolando-se linearmente os valores de 75 W e 150 W. O comportamento da atividade metabólica diária assumida para a população de Cuiabá-MT pode ser visualizado na Figura 33a. A energia liberada pelos animais não foi considerada neste trabalho, pois não há dados disponíveis na cidade de Cuiabá-MT.

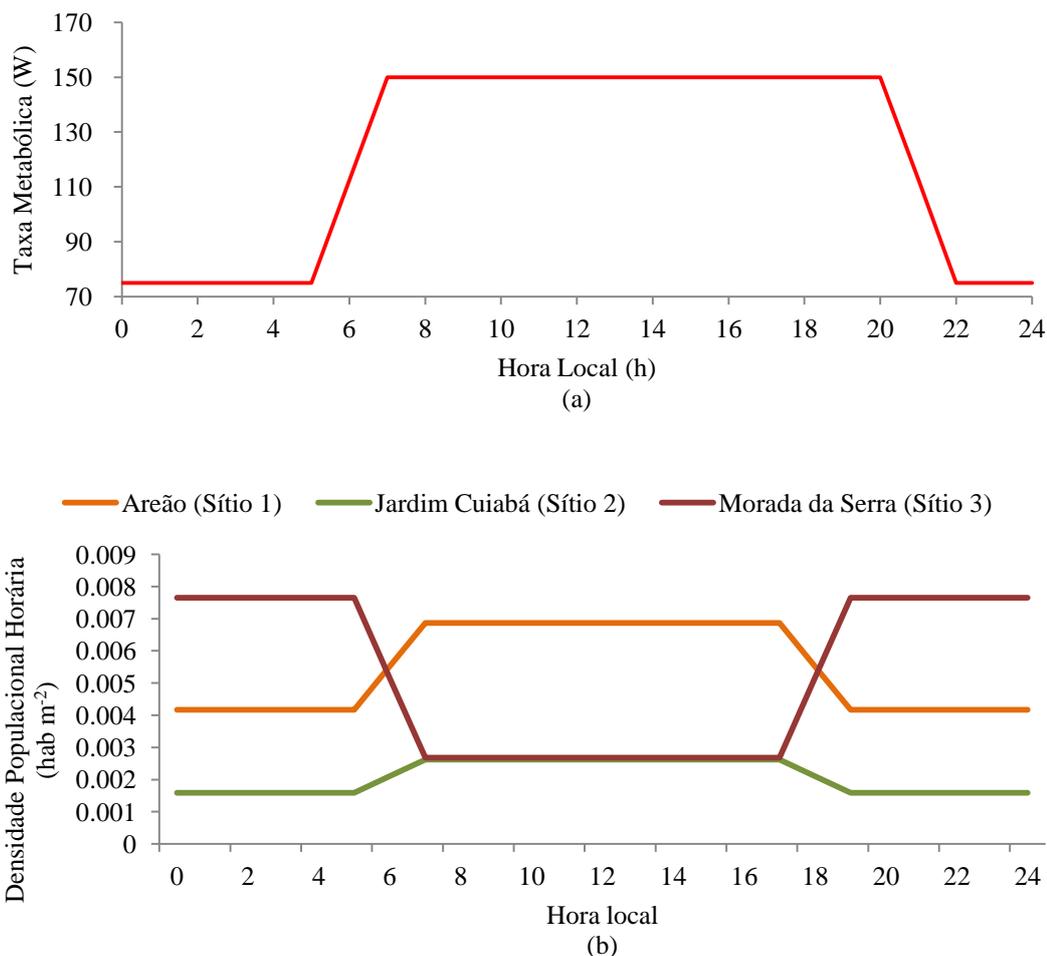


Figura 33 – Variação diária da taxa metabólica (a) e da densidade populacional (b) no entorno das áreas estudadas

A densidade de população horária $\rho_{pop}(h)$ foi obtida a partir de *NWRP* e *WP*, onde estes termos se referem as pessoas residentes e não residentes na cidade núcleo. Como as áreas estudadas estão localizadas em regiões distintas da cidade, adaptou-se a metodologia proposta por Sailor e Lu (2004) para que ela pudesse ser utilizada para expressar o comportamento da população dos bairros da cidade. Assim, *NWRP* foi admitida ser a população residente nos bairros onde os sítios estão localizados e *WP* foi admitida poder ser representada pela população que chega ou sai do bairro para trabalhar ou estudar (movimento pendular da população). Desta forma, *NWRP* foi avaliada a partir dos dados de densidade populacional e áreas territoriais de cada bairro onde os sítios pesquisados estavam inseridos.

Conforme apresentado em IPDU (2009), o Sítio 1 está localizado no bairro Areão (região central) e apresenta densidade populacional igual a

0,00555 habitante m^{-2} , enquanto os Sítios 2 e 3, localizados nos bairros Jardim Cuiabá e Morada da Serra (bairros periféricos), apresentam densidade populacionais iguais a 0,00159 habitante m^{-2} e 0,00765 habitante m^{-2} , respectivamente. Na estimativa de *WP*, considerou-se que o deslocamento para o trabalho e o estudo (movimento pendular) dos bairros da cidade acompanhe a taxa de deslocamento do estado de Mato Grosso, que é de 65% da população residente (IBGE, 2000). Assim sendo, trabalhou-se com a hipótese de que o bairro Areão (sítio central), com características comerciais, tem sua densidade populacional de 0,00555 habitante m^{-2} durante a noite (antes de 5h e após 19h), aumentada durante o dia (entre 7h e 17h) para 0,00915 habitante m^{-2} , pois este bairro, localizado nas proximidades da região central da cidade e circundado por avenidas de grande fluxo, recebe grande deslocamento populacional para trabalho e/ou estudo. Durante o período de transição noite-dia e tarde-noite, adotou-se densidade igual à média entre o período noturno e diurno, igual a 0,00735 habitante m^{-2} .

Para o bairro Jardim Cuiabá (sítio periférico), com características residenciais, mas também comercial (uso misto), adotou-se comportamento semelhante ao bairro Areão, pois o mesmo atrai diariamente enorme quantidade de pessoas devido a presença de clínicas hospitalares em seu interior e encontra-se sob a influência e nas proximidades de avenidas com intenso tráfego de veículos. Assim, a densidade população adotada para a noite foi de 0,00159 habitante m^{-2} (antes de 5h e após 19h) e durante o dia (entre 7h e 17h), a densidade foi aumentada para 0,00262 habitante m^{-2} . Durante os períodos de transição, admitiu-se densidade igual a 0,00210 habitante m^{-2} .

No bairro Morada da Serra, predominantemente residencial, adotou-se densidade populacional igual a 0,00765 habitante m^{-2} durante a noite (antes de 5h e após 19h) e durante o dia (entre 7h e 17h), a densidade foi reduzida para 0,00268 habitante m^{-2} em virtude do deslocamento da população para outras regiões da cidade, para trabalho e/ou estudo. A densidade da população durante os períodos de transição foi admitida igual a 0,00516 habitante m^{-2} . Como os dados de fluxos de veículos disponibilizados por Miranda (2010) se encontrava distante do Sítio 3 e com intuito de confirmar o comportamento observado pelo autor, realizou-se medições de tráfego na Av. Historiador Rubens de Mendonça, nas proximidades do Sítio 3. A

medição de fluxo indicou que os fluxos de veículos que deixam o bairro são maiores do que aqueles de saem durante o dia, mas durante a noite, contatou-se comportamento oposto, ou seja, a quantidade de veículos que chega ao bairro é maior do que aquela que sae, confirmando a hipótese adotada de que o mesmo apresenta características residenciais. A variação diária da densidade população adotada para os Sítios 1, 2 e 3 pode ser visualizada na Figura 33b e foi assumida ser constante durante todos os dias de um mês e durante todos os meses do ano no entorno dos sítios estudados.

4.2.5 Avaliação do Calor Armazenado Dentro do Dossel Urbano (ΔQ_s)

A escolha do método para a avaliação do calor armazenado no dossel urbano neste trabalho foi feita levando em consideração a disponibilidade de dados para a sua realização. Como os modelos empíricos são relativamente mais simples, bastando-se ter disponível o saldo de radiação na superfície, bem como a fração da cobertura da superfície urbana, facilmente determinada devido a disponibilidade de imagens de satélite de alta resolução para as regiões em estudo (GOOGLE, 2010), adotou-se o Modelo Objetivo de Histerese (OHM) proposto por Grimmond et al. (1991). Nesse modelo, conforme destacam Christen e Vogt (2004), o fluxo de energia armazenada dentro do dossel urbano responde de forma não linear (histerese) e diretamente proporcional à variação horária do saldo de radiação líquida disponível na superfície para todos os comprimentos de onda.

A avaliação do uso e ocupação do solo foi feita conforme descrito no Item 4.2.2 A metodologia definida pela Equação 31 é semelhante à apresentada por Grimmond e Oke (1999), a única diferença é que o termo A_p foi introduzido com intuito de levar em consideração as áreas (solo) que não são cobertas por vegetação, mas que se encontram parcialmente ou totalmente desnudas. No trabalho de Grimmond e Oke (1999), assim como no de Ferreira (2010), estes termos de vegetação e solo foram agregadas em uma única área, as vegetadas. De posse dos valores das áreas que perfazem o uso e ocupação do solo no entorno dos sítios pesquisados, é possível calcular as frações de cobertura (f_i) para cada tipo de superfície existente dentro do raio de influência de 500 m proposto por Oke (2006).

Os coeficientes de regressão a_1 , a_2 e a_3 , que correspondem à resposta do modelo de histerese de cada tipo de superfície presente dentro do meio urbano, foram obtidos a partir de modelos de regressão em função da resposta do fluxo de calor no solo em áreas vegetadas, solo nu ou parcialmente coberto localizadas na região da Baixada Cuiabana e região de Sinop – MT (solo tipo canga laterítica). Procedimento análogo foi adotado para os coeficientes a_1 , a_2 e a_3 para o concreto através da resposta dos fluxímetros instalados dentro do concreto nos pátios das escolas estudadas. Para cobertura (telhado cerâmico), asfalto e cânions urbanos (paredes) utilizou-se os coeficientes médios apresentado nos trabalhos de Meyn e Oke (2009), Anandakumar (1999) e Nunez (1974) e Yoshida et al. (1991), respectivamente.

Os valores médios dos coeficientes a_1 , a_2 e a_3 obtidos por regressão e adotados para os diferentes tipos de superfícies existentes no entorno dos sítios pesquisados podem ser visualizados na Tabela 9. Optou-se por utilizar dados disponíveis na região de estudo visto que estudos iniciais demonstraram que os coeficientes determinados em regiões de clima temperado (Canadá, Estados Unidos e Europa) não conseguiram representar adequadamente a histerese verificada nos materiais presentes dentro do dossel urbano da região pesquisada (CALLEJAS et al., 2011d). A utilização dos coeficientes propostos por Grimmond et al. (1991), bem como em Grimmond e Oke (1999a), Meyn (2000), Grimmond e Oke (2002) e Meyn (2009) se utilizados na região em estudo elevaria a quantidade de energia armazenada dentro do dossel urbano, e conduziriam a menor exatidão no comportamento da energia armazenada dentro do dossel urbano nas áreas pesquisadas.

Para avaliar ΔQ_s , há a necessidade de avaliar o termo dQ^*/dt que representa a taxa de variação da entrada de energia no meio em um instante t . A sua determinação pode ser feita por meio de discretização em termos de diferenças finitas da seguinte forma:

$$dQ^*/dt = 0,5(Q^*_{t+1} - Q^*_{t-1})/\Delta t \quad \text{Equação 36}$$

em que Q^*_{t+1} e Q^*_{t-1} representam o valor do saldo de radiação nos instantes $t+1$ e $t-1$, respectivamente, e o termo Δt representa o intervalo de tempo em que a taxa de variação do saldo de radiação é avaliada, normalmente de 0,5 ou 1 horas. A unidade de dQ^*/dt é dada em $W\ m^{-2}\ h^{-1}$, o parâmetro a_1 é adimensional, a_2 é expresso em tempo (h) e a_3 em fluxo de energia ($W\ m^{-2}$) (Figura 5).

Tabela 9 – Coeficientes médios adotados para o Modelo OHM proposto por Grimmond et al. (1991) para estimar o fluxo de calor armazenado no dossel urbano nos sítios localizados na cidade de Cuiabá – MT

Tipo de Superfície	Valores médios anuais	a_1 (adimensional)	a_2 (h)	a_3 (Wm^{-2})
Área vegetada	Dados de Sinop-MT ¹	0,03	-0,03	-3,30
Solo total ou parcialmente desnudo	Dados Fazenda Miranda ²	0,26	-0,07	-22,75
Asfalto	Anandakumar (1998) ³	0,84	-0,83	-19,29
Concreto ⁴	Sítio 1	0,21	-0,43	-13,90
	Sítio 2	0,27	-0,28	-1,58
	Sítio 3	0,11	-0,18	-5,17
Telhado (telha cerâmica)	Meyn (2000)	0,07	0,26	-6,0
Cânions Urbanos	Nunez (1974) e Yoshida et al. (1990–91)	0,52	0,03	-34,0

1 Coeficientes obtidos na floresta de Sinop para o ano de 2002

2 Solo tipo canga laterítica. Coeficientes obtidos para o período de setembro de 2010 a agosto 2011

3 Média do período em que a_2 e a_3 apresentaram valores negativos

4 Dados obtidos com os fluxímetros instalados nos sítios de setembro de 2010 a agosto 2011

4.2.6 Calibração dos Instrumentos

Os saldos radiômetros, bem como os termo-higrômetros utilizados nesta pesquisa, foram calibrados durante período de 2 dias sob as mesmas condições atmosféricas: o primeiro ao ar livre e o segundo dentro de um abrigo meteorológico (Figura 34a e 34b). Os intervalos de leitura dos dados foram ajustados a cada 10 segundos, com médias a cada 5 minutos. As calibrações foram realizadas por regressões lineares simples a partir dos valores de temperatura e umidade e pressão atual de vapor d'água do sensor tomado como referência, no caso, o sensor instalado no nível intermediário de cada área estudada. Procedimento semelhante foi adotado para a calibração dos saldos radiômetros.

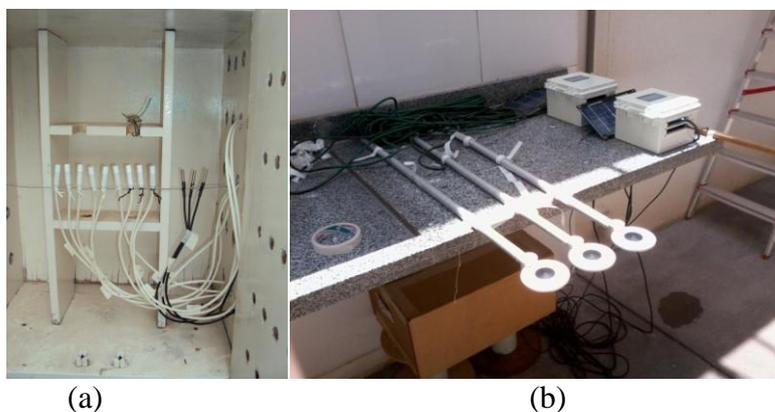


Figura 34 – Detalhe da calibração dos sensores (a) termo-higrômetros e (b) saldos radiômetros.

4.2.7 Estimativa do Fluxo de Calor Latente (Q_H) e Calor Sensível pelo Método da Razão de Bowen

O método da razão de Bowen foi utilizado para estimar os componentes do balanço de energia nos Sítios 1, 2 e 3, através da utilização dos gradientes de temperatura (ΔT) e pressão de vapor d'água atmosférico (Δe) nas alturas descritas no item 4.1.1, bem como das medidas de saldo de radiação no dossel urbano (Q^*), das estimativas do calor antropogênico liberada no meio (Q_F) e do calor armazenado dentro do dossel urbano (ΔQ_s) pela Equação 18.

Como os dados de umidade registrados pelos sensores estavam em umidade relativa (UR_a) (%), para avaliar a pressão atual d'água atmosférico (e), calculou-se inicialmente a pressão de vapor d'água do ar saturado (e_s) em kPa, para cada altura em função da temperatura do ar (T_a) através da seguinte equação:

$$e_s = 0,6108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5T_a}{237,3+T_a}\right)} \quad \text{Equação 37}$$

Na sequência, a pressão atual d'água atmosférico (e) foi avaliada pela pressão atual d'água atmosférico saturado (e_s), utilizando a seguinte equação:

$$e = e_s UR_a \quad \text{Equação 38}$$

De posse da diferença de temperatura (ΔT) e da pressão de vapor do ar atual (Δe) entre dois níveis, a razão de Bowen em cada nível foi obtida pela Equação (25), ou seja:

$$\beta = \gamma (\Delta T / \Delta e) \quad \text{Equação 39}$$

A constante psicrométrica (γ) foi avaliada através da seguinte equação:

$$\gamma = c_p p / \epsilon L_v \quad \text{Equação 40}$$

em que c_p é o calor específico do ar úmido a pressão constante ($1,013 \text{ KJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), p é a pressão atmosférica, ϵ é a razão entre os pesos moleculares do vapor d'água e do ar ($0,622$), e L_v é o calor latente de vaporização da água em MJ kg^{-1} obtido pela equação:

$$L_v = 2,501 - 0,002361 T_{a(\text{médio})} \quad \text{Equação 41}$$

em que $T_{a(\text{médio})}$ a temperatura média do ar entre os níveis de medição.

Avaliada a razão de Bowen (β), os fluxos de calor latente (Q_E) e sensível (Q_H) em $W m^{-2}$ foram avaliados utilizando as equações apresentadas na equação (24), (26) e (27).

O controle de qualidade dos dados foi feito através da metodologia proposta por Perez et al. (1999). O primeiro critério aplicado aos dados foi o físico representado pela equação (29). Caso os dados trabalhados não atendessem os casos descritos na Tabela 2, eles eram eliminados. Na sequência, avaliou-se o intervalo de exclusão de β quando este se aproxima de -1 ($-1 - |\varepsilon| < \beta < -1 + |\varepsilon|$) a partir do erro nas imediações de β ($\varepsilon = \delta\beta$), dado pela equação (30) devido a resolução dos sensores. Caso a razão de Bowen calculada ficasse inserida dentro do intervalo de exclusão, ela era eliminada e os fluxos não eram avaliados. Caso os dados atendessem as duas condições iniciais apresentadas, a razão era então avaliada e os fluxos estimados.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

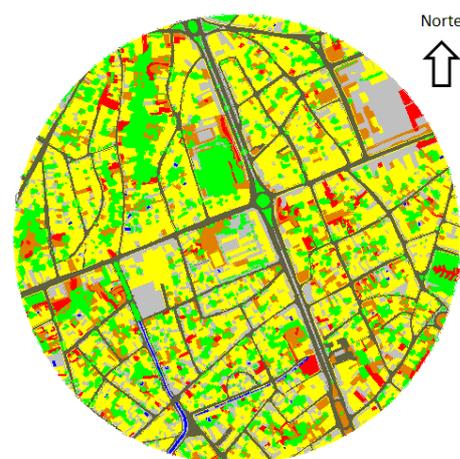
5.1 MORFOLOGIA DO ENTORNO DOS SÍTIOS URBANOS

O entorno do Sítio 1 é caracterizado por predominância de área construída (soma da fração de área impermeável com a de telhados), seguido das áreas de cânions urbanos (paredes), vegetadas e solo total/ parcialmente descoberto (Tabela 10, Figura 35a). A consideração das áreas dos cânions urbanos em conjunto com as áreas planas do sítio corroborou para elevação das áreas ativas em 33%, ou seja, devido a configuração tridimensional do entorno do Sítio 1 existe um acréscimo considerável de áreas que são responsáveis pelo armazenamento de calor dentro do dossel urbano.

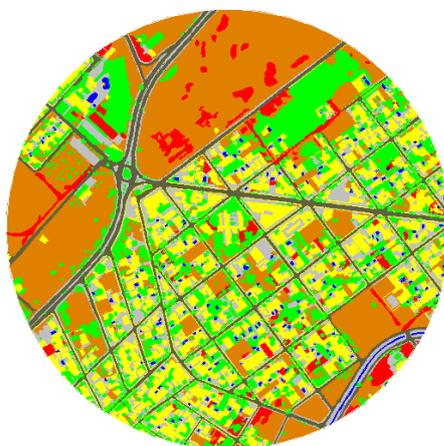
Tabela 10–Fração de área para cada categoria adotada no entorno dos Sítios 1, 2 e 3

Uso e ocupação do solo	Fração de Área ($A_{\text{parcial}}/A_{\text{total}}$)					
	Área vegetada (A_V)	Área Impermeável (A_I)	Solo Total e Parcialmente Descoberto (A_P)	Área de Telhados (A_T)	Área de Cânions Urbanos (A_C)	A_{plana}/A_S
Sítio 1	11,42%	21,72%	8%	33,97%	24,88%	1,33
Sítio 2	14,67%	24,21%	30,11%	18,58%	12,40%	1,14
Sítio 3	7,14%	24,03%	8,66%	36,25%	23,90%	1,31

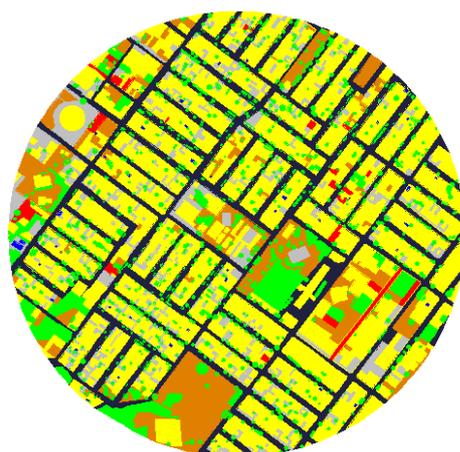
O entorno do Sítio 2 segue comportamento diferenciado do Sítio 1 pois há predominância de áreas construídas, solo total/ parcialmente descoberto, vegetadas e cânions urbanos (Tabela 10, Figura 35b). No entanto, observa-se que as áreas construídas são inferiores às quantificadas nos Sítios 1 e 3, enquanto as áreas vegetadas e solo total/ parcialmente descoberto apresentam comportamento inverso às verificadas nos Sítios 1 e 3, ou seja, maior presença de massa vegetadas e solos não edificadas em seu entorno. O comportamento descrito é o que caracteriza o entorno do Sítio 2, ou seja, presença de grandes áreas não ocupadas por edificações, muitas delas cobertas por vegetação. Os cânions urbanos estão presentes em menor proporção no entorno do Sítio 2, apenas 14,16%. Devido à menor configuração tridimensional desse sítio, espera-se que o calor armazenado dentro do dossel urbano seja menor dentre os sítios estudados.



a)



b)



c)

Uso e ocupação do solo

- Área Vegetada
- Superfície Líquida
- Solo descoberto
- Solo parcialmente descoberto
- Área construída
- Área de pavimento asfáltico
- Outros tipos de pavimento (concreto)

Figura 35 – Uso e ocupação do solo no entorno dos Sítios 1(a), 2 (b) e 3(c)

O entorno do Sítio 3 é marcado por elevadas frações de áreas construídas em seu entorno (Tabela 10, Figura 35c). Ao contrário do que acontece nos Sítios 1 e 2, as áreas não edificadas predominam sob as vegetadas. Este comportamento pode se traduzir em menor taxa de evapotranspiração naqueles ambientes. Sob o ponto de vista dos cânions urbanos, observa-se que estes contribuem para aumentar a tridimensionalidade do sítio com taxa muito semelhante à observada na região mais central da cidade (31%). Desta forma, a menor presença de vegetação, aliada às elevadas áreas tridimensionais, tornam o Sítio 3 um local propício para armazenamento de energia dentro do dossel urbano, o que pode fazer com que este sítio suburbano apresente comportamento semelhante ao observado na região central da cidade (Sítio 1).

Ao se analisar comparativamente o entorno dos sítios, inicialmente sob o ponto de vista de área construída, nota-se que o Sítio 3 é o que apresenta maior fração de área construída (60,28%), seguido do Sítio 1 (55,69%) e Sítio 2 (42,80%), respectivamente. Esse comportamento é justificado devido ao fato do Núcleo Habitacional CPA 1 ser um empreendimento planejado, tipicamente residencial e destinado a famílias de baixa renda.

Nesses empreendimentos normalmente o poder público procura maximizar a implantação de lotes dentro do sítio urbano, o que acaba conferindo a estes altas taxas de áreas construídas, como a verificada no CPA 1. No entanto, esperava-se que o Sítio 1 apresentasse maior fração de área construída dentre os sítios estudados visto que este se localiza em região mais central na cidade. Justifica-se o comportamento observado devido ao fato do bairro Areão ter sido implantado sem nenhum tipo de planejamento, tanto em termos de ordenamento quanto de ocupação. Isso é facilmente constatado pelo formato das quadras e disposição dos lotes dentro das mesmas (Figura 35a). Outro aspecto a ser destacado é a presença de grandes áreas vegetadas e não edificadas no seu entorno, como o campo para prática esportiva localizado ao norte, a vegetação de mata ciliar que percorre o Córrego do Gambá e a presença de uma Subestação de Alta Tensão (nordeste), o que contribui para menor área construída no entorno deste sítio.

Em termos de área não edificada, o Sítio 2 apresenta comportamento diferenciado dos demais, com maior fração de solo total/ parcialmente descoberto (30,11%), o que lhe conferiu menor fração de área construída. Por outro lado, os Sítios 3 e 1 apresentaram taxas muito semelhantes de solo total/ parcialmente descoberto (8,66 e 8%, respectivamente). A maior quantidade de vazios urbanos verificada no Sítio 2 pode fazer com que este apresente comportamento análogo a sítios rurais em que alguns instantes do dia, onde a temperatura do ar pode chegar a ser maior e a umidade do ar menor do que observadas em regiões mais centrais da cidade, como o caso do Sítio 1.

Outro aspecto que deve ser destacado no Sítio 2 é que este apresenta maior fração de áreas vegetadas entre os sítios estudados (14,67%), 1,28 vezes maior que a do Sítio 1 (11,42%) e 2,02 superior a do Sítio 3 (7,14%). Essa característica pode-se contrapor ao efeito gerado devido à presença de elevada fração de solo total e parcialmente descoberto, elevando as taxas de evapotranspiração na região, aumentando desta forma a concentração de vapor d'água deste sítio, principalmente nos períodos noturnos (OKE, 1987).

Com relação à fração de área impermeável (superfícies de asfalto e concreto, relacionadas principalmente às áreas do sistema viário), verifica-se que esta seguiu o comportamento observado da fração de área construída, onde os maiores valores foram registrados nos Sítios 2 (24,21%), 3 (24,03%) e 1 (21,72%), respectivamente. Os resultados encontrados se assemelham aos registrados por Mascaró (2003) para rendimentos em loteamentos urbanos, onde a fração área viária em loteamentos implantados com malhas abertas e fechadas ficaram compreendidas entre 20,9 a 27,2% da área do sítio urbano.

Sob o aspecto das superfícies das paredes presentes dentro dos cânions urbanos, observa-se que a presença das edificações introduziram 24,88% a mais de área ativa no entorno Sítio 1, enquanto que nos Sítios 2 e 3, houve um acréscimo de 12,40 e 23,9%, respectivamente. É importante destacar que estas áreas em conjunto com as áreas impermeáveis são responsáveis por elevar o termo de calor armazenado dentro do dossel urbano (ΔQ_S) (OKE e CLEUGH, 1987).

Uma forma de se avaliar a morfologia tridimensional presente dentro do cânion urbano é calcular a relação entre a superfície ativa (A_S) e área plana (A_{pl})

presente dentro do sítio estudado (GRIMMOND e SOUCH, 1994). Deste modo, observa-se que o Sítio 1 é o que apresenta maior quantidade de superfícies ativas dentro do dossel urbano (1,33), seguido muito próximo do Sítio 3 (1,31) e mais distante do Sítio 2 (1,14), respectivamente.

Grimmond et al. (1998), ao avaliar as superfícies ativas no entorno de alguns sítios localizados na cidades do Canadá, Estados Unidos e México, encontraram valores entre 1,16 a 1,42 em regiões de subúrbio e de 1,75 em região central. Os resultados avaliados nos Sítios 1, 2 e 3 encontram-se dentro dos valores determinados por Grimmond et al. (1998) em regiões de subúrbios, inclusive o da região central da cidade (Sítio 1).

Ao se confrontar os dados apresentados na Tabela 11, é possível constatar que os entornos dos sítios 1 e 3 apresentam comportamentos muito semelhantes, enquanto o Sítio 2 se diferencia dos demais. A classificação dos mesmos segundo a metodologia proposta por Oke (2006), revelou que os Sítios 1 e 3 apresentam elevada fração construída (74,15 e 79,23% da área plana), rugosidade elevada (classe 7), e cânions urbanos com fração média de 0,4 e 0,3, respectivamente, o que as inserem dentro da classificação proposta na Zona Climática Urbana 3, com elevado desenvolvimento urbano e média densidade urbana (Tabela 11).

O Sítio 2, com menor fração de área construída (48,86%), rugosidade superficial (classe 6) e cânion urbano com fração média de 0,4, apresenta característica de médio desenvolvimento urbano e baixa densidade urbana, inserindo-se dentro da classificação proposta na Zona Climática Urbana 5. Outros aspectos que devem ser comentados, além das frações de área construída já destacadas, são suas elevações em relação ao nível do mar, altura dos edifícios, bem com as taxas de área permeável estimadas em seus entornos (Tabela 11).

Tabela 11 – Caracterização e descrição geral do entorno e dos sítios urbanos

Identificação Sítio	Sítio 1	Sítio 2	Sítio 3
1-Entorno			
1.1. Uso e Ocupação	Comercial, Institucional e Residencial	Comercial, Institucional e Residencial	Comercial, Institucional e Residencial
1.2. Descrição da cobertura da terra	Média Urbanização-Tabela 10, Figura 35a	Média Urbanização-Tabela 10, Figura 35b	Média Urbanização-Tabela 10, Figura 35c
1.3. Tipo de Telhados	Duas Águas-Telha cerâmica/Fibrocimento	Duas Águas-Telha cerâmica/Fibrocimento	Duas Águas-Telha cerâmica/Fibrocimento
1.4. Pavimentos	1-2	1-4	1-2
1.5. Paredes	Alvenaria em blocos cerâmicos	Alvenaria em blocos cerâmicos	Alvenaria em blocos cerâmicos
1.6. Vegetação	Arvores Decíduas > altura dos edifícios	Arvores Decíduas > altura dos edifícios	Arvores Decíduas > altura dos edifícios
1.7. Outras Características	Avenidas/ruas-asfalto; Calçadas-concreto	Avenidas/ruas-asfalto; Calçadas - concreto	Avenidas/ruas-asfalto; Calçadas-concreto
1.8. Elevação do Sítio Urbano	173-202m	168-193m	246-222m
1.9. Variação da altura dos edifícios	4-8m	4-12m	4-8m
1.10. Cânions urbanos (H/W)	0,4	0,4	0,3
1.11. Classe de Rugosidade	Muito Rugoso - Classe 6 - $z_0=0,5m$	Muito Rugoso - Classe 6 - $z_0=0,5m$	Muito Rugoso - Classe 6 - $z_0=0,5m$
1.13. Zona Climática Urbana	74,15% impermeável - H/W=0,4 - Zona 3	48,86% impermeável - H/W=0,4 - Zona 5	79,23% impermeável - H/W=0,3 - Zona 3
2-Sítio			
2.1. Uso e Ocupação	Institucional-Escola da Rede Pública	Institucional-Escola da Rede Pública	Institucional-Escola da Rede Pública
2.2. Descrição da cobertura da Terra	Imper. 46,40%; Veg. 6,22%; Perm. 47,38%	Imper. 35,69%; Veg. 34,58%; Perm. 28,73%	Imper. 54,64%; Veg. 10,03; Perm. 35,33%
2.3. Tipo de Telhado dos Edifícios	Duas águas - telha de fibrocimento	Duas águas - telha de fibrocimento	Duas águas - telha de fibrocimento
2.4. Pavimentos	1	1	1
2.5. Paredes (cores)	Alvenaria-bloco cerâmico (laranja/amarelo)	Alvenaria-bloco cerâmico (rosa /azul)	Alvenaria-bloco cerâmico (amarelo)
2.6. Outras características	Pátio central-concreto; Interblocos-brita	Pátio central-concreto; Interblocos-concreto	Pátio central-concreto; interblocos-solo
2.7. Elevação em relação nível mar	197m	179m	233m
2.8. Altura dos edifícios	3,6m	4,6m	3,6m
2.9. Largura entre edifícios	20m	20m	20m
2.10. Cânion sítio (H/W)	0,18	0,18	0,18
2.11. Índice área plana/frontal (λ_p, λ_F)	0,33; 0,03	0,33; 0,04	0,33; 0,03
2.13. Deslocamento do plano zero (z_d)	2,13m	2,72m	2,13m
2.14. Comp. Rugos. Morfométrico (z_0)	0,02m	0,04m	0,019m
2.15. Albedo (α) (medido)	0,191	0,195	0,207
2.16. Porte, ISA e IDA	26%G, 26%M e 48%P; 6,22, 0,24	62%G, 22%M e 16%P; 34,6; 0,80	42%G, 17%M e 41%P; 10,03; 0,26

Quando se analisa as áreas internas pertencentes a cada sítio, observa-se que elas se diferenciam entre si, apesar de serem escolas estaduais implantadas com o mesmo partido arquitetônico. Ao se confrontar a cobertura da terra, verifica-se que o Sítio 3 é mais impermeável, seguido pelos Sítios 1 e 2, respectivamente (Tabela 11).

Analisando os sítios sob o aspecto de cobertura do solo, constata-se que no Sítio 1 há uma enorme quantidade de solo coberto por brita, principalmente nas áreas interblocos, o que pode contribuir para que haja maior armazenamento de energia dentro do dossel urbano deste sítio. Ao redor da quadra poliesportiva, observa-se área com solo sem nenhum tipo de revestimento vegetativo.

No Sítio 2 existe uma enorme área coberta por grama (campo para prática desportiva), o que não permite que solo fique exposto e pode contribuir para elevar a evapotranspiração, elevando a umidade naquele ambiente, regulando desta forma a temperatura do ar. Por outro lado, o fato de os espaços interblocos estarem revestidos por concreto pode reduzir o efeito evaporativo gerado pela presença da vegetação.

O Sítio 3 apresenta áreas interblocos com uso misto, cobertas por concreto e por solo nu. Observa-se no fundo da escola a presença de duas quadras poliesportivas, ambas impermeabilizadas com concreto, fazendo como que o Sítio 3 apresente elevadas taxas de impermeabilização (> 50%), o que pode contribuir para elevar a temperatura superficial e diminuir a evaporação/ transpiração e conseqüentemente elevando a temperatura do ar e diminuindo a umidade do ar naquele ambiente.

Os dados de rugosidade superficial apresentados na Tabela 11 demonstram que o Sítio 2 é o mais rugoso entre os estudados. De fato, o ambiente do Sítio 2 é caracterizado pela presença de enorme quantidade de espécies arbóreas, muitas delas de grande porte (ver Item 2.16, Tabela 11) que se localizam principalmente na periferia do sítio. Este sítio é o único que apresenta vegetação no pátio central da escola, nas proximidades do local de coleta dos dados meteorológicos.

É importante destacar que a altura destas árvores não foram levadas em consideração na avaliação de altura média dos edifícios (z_H), o que de certa forma reduziu o índice de rugosidade superficial avaliado neste terreno. Outro fato importante é a presença de topografia acentuada, o que fez com que os blocos

escolares fossem implantados de forma escalonada dentro do sítio por meio de taludes. Por este motivo, a altura média dos edifícios (z_H) foi considerada maior em 1 m (desnível) em relação a altura dos outros edifícios dos outros sítios. Nos Sítios 1 e 3, considerou-se rugosidade superficial iguais pois a altura média das edificações são iguais.

Ao se analisar os sítios sob o aspecto da arborização, em termos de projeção das copas sob a superfície, constata-se que o Sítio 2 apresenta ISA 5 vezes superior ao Sítio 1 e 3,4 vezes ao Sítio 3. Por outro lado, o Sítio 3 apresenta ISA 1,5 vezes superior ao Sítio 1. No entanto, em nenhum dos sítios observou-se ISA superior a 50%, conforme sugerido por Simões et al. (2001) para bairros com funções residenciais.

Caso o uso e ocupação do solo seja considerado misto, como apresentado na Tabela 11, o único sítio que atende a condição de pelo menos 30% é o Sítio 2, com 34,6%. Em termos IDA, nenhum sítio atingiu o índice ideal que seria 1 exemplar a cada 100 m². Isso demonstra a carência da vegetação arbórea dentro dos sítios estudados. No entanto, pode-se considerar que o Sítio 2 apresentou resultado satisfatório (0,80), se aproximando de 1,0.

Diante desses resultados, nota-se que o Sítio 2 foi o que apresentou melhor qualidade de arborização, apesar da análise do ISA e do IDA deve estar atrelada a diversidade arbórea existente no local (não realizada neste trabalho). Ademais, os indicadores reforçam a necessidade de plantio de árvores para melhorar a qualidade das áreas verdes dentro dos Sítios 1 e 3.

É oportuno ressaltar que se espera em áreas com maior presença de vegetação, que a evapotranspiração seja maior, e conseqüentemente, a umidade do ar. Este fato foi ratificado na análise microclimática dos sítios apresentada no Item 5.2.3.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS

5.2.1 Precipitação Pluviométrica

A precipitação acumulada entre setembro de 2010 e agosto de 2011 obtida na Estação Meteorológica do Aeroporto Marechal Rondon foi de 1042,9mm (Figura 36). A precipitação no período apresentou sazonalidade característica da região, com período de chuvas compreendido entre outubro e abril e período de estiagem entre maio a setembro (Campelo Junior et al., 1991). A estação úmida foi responsável por 1020,9 mm da precipitação pluviométrica, enquanto a estação seca por apenas 22 mm, donde se conclui que a primeira foi responsável por 97,90% da precipitação total. Os meses de janeiro a março representam quase 70% de toda a precipitação acumulada na região durante o período estudado. Os meses de setembro e outubro de 2010, bem como os de maio, junho, julho e agosto de 2011, apresentaram precipitação inferior a 60 mm, característica importante na definição dos climas tipo megatérmicos do grupo 'A'. A outra é que a temperatura média mensal seja superior a 18°C em todos os meses do ano, conforme constatado no Item 5.2.3.

5.2.1.1 Comparação com as Normais Climatológicas (1961-1990)

Ao se comparar a precipitação do período de 1042,90 mm, constata-se que ela foi 22,57% inferior à precipitação média anual de 1346,9 mm avaliada por Campelo Junior et al. (1991) entre os períodos de 1901 a 1989 e 22,30% inferior média histórica anual de 1342,3mm avaliada pelo INMET (2009) entre os períodos de 1961 a 1990 (Normais Climatológicas). Com exceção dos meses de janeiro e março, os demais meses do período analisado apresentaram precipitação inferior à média histórica mensal, o que contribuiu para que o período estudado fosse mais seco que a média histórica registrada pelas Normais Climatológicas. Gomes (2010), em estudo realizado na cidade de Cuiabá com dados de 2007, verificou que a precipitação acumulada naquele ano alcançou 1322,6 mm, valor próximo ao da média histórica anual, sendo que na estação úmida, houve precipitação de 1080 mm, superior à determinada nesta pesquisa.

5.2.1.2 Comparação Interurbanas entre os Sítios

Devido a indisponibilidade de pluviômetros instalados nos Sítios 1, 2 e 3, esta análise comparativa não foi passível de ser realizada.

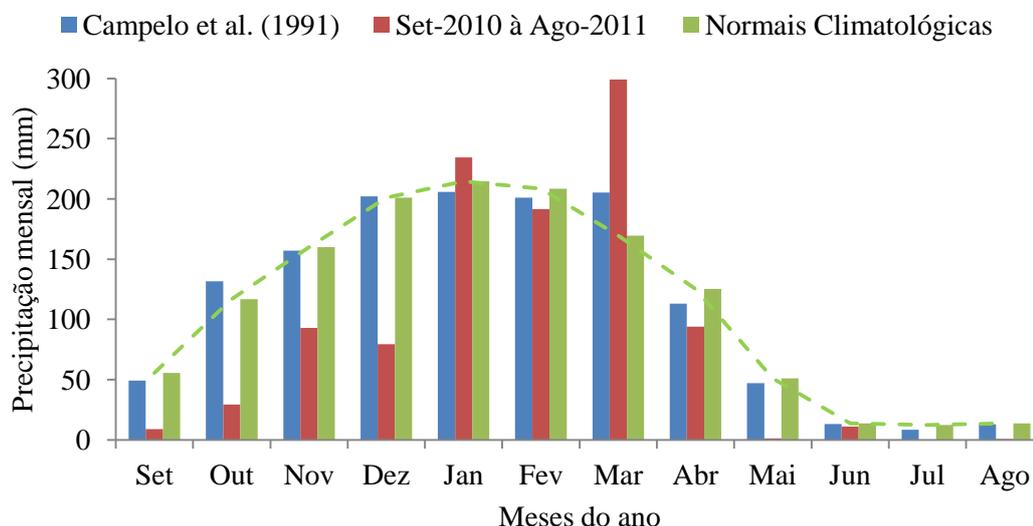


Figura 36 – Precipitação mensal entre os meses de setembro de 2010 a agosto de 2011 e médias mensais de precipitação avaliadas por Campelo Junior et al. (1991) e pelo INMET entre 1961 à 1990

5.2.2 Radiação Solar Incidente

A radiação média anual observada no Sítio 1 foi de $361,11 \pm 231,50 \text{ W m}^{-2}$ ou $16,68 \pm 4,07 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Ao se analisar o comportamento estacional da radiação solar incidente (R_g), observa-se que o mesmo apresentou padrões de variabilidade sazonal (Figura 37). Evidenciou-se o efeito da diminuição da radiação solar entre a estação úmida e seca, com média e desvio padrão (DP) de $360,60 \pm 40,42 \text{ W m}^{-2}$ e $372,67 \pm 17,45 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente, o que representa uma queda de aproximadamente 3,23% do período úmido para o seco. Os padrões mensais de R_g indicam menor média e desvio padrão da incidência de radiação solar em novembro com $297,43 \pm 183,59 \text{ W m}^{-2}$ ou $14,48 \pm 4,29 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, e maior em abril, com $415,31 \pm 258,32 \text{ W m}^{-2}$ ou $18,34 \pm 2,89 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Sob o aspecto do ciclo diurno da radiação solar, na estação seca, a máxima amplitude e valor médio horário foram observados em setembro ($755,84 \text{ W m}^{-2}$), enquanto na úmida, em janeiro ($851,83 \text{ W m}^{-2}$).

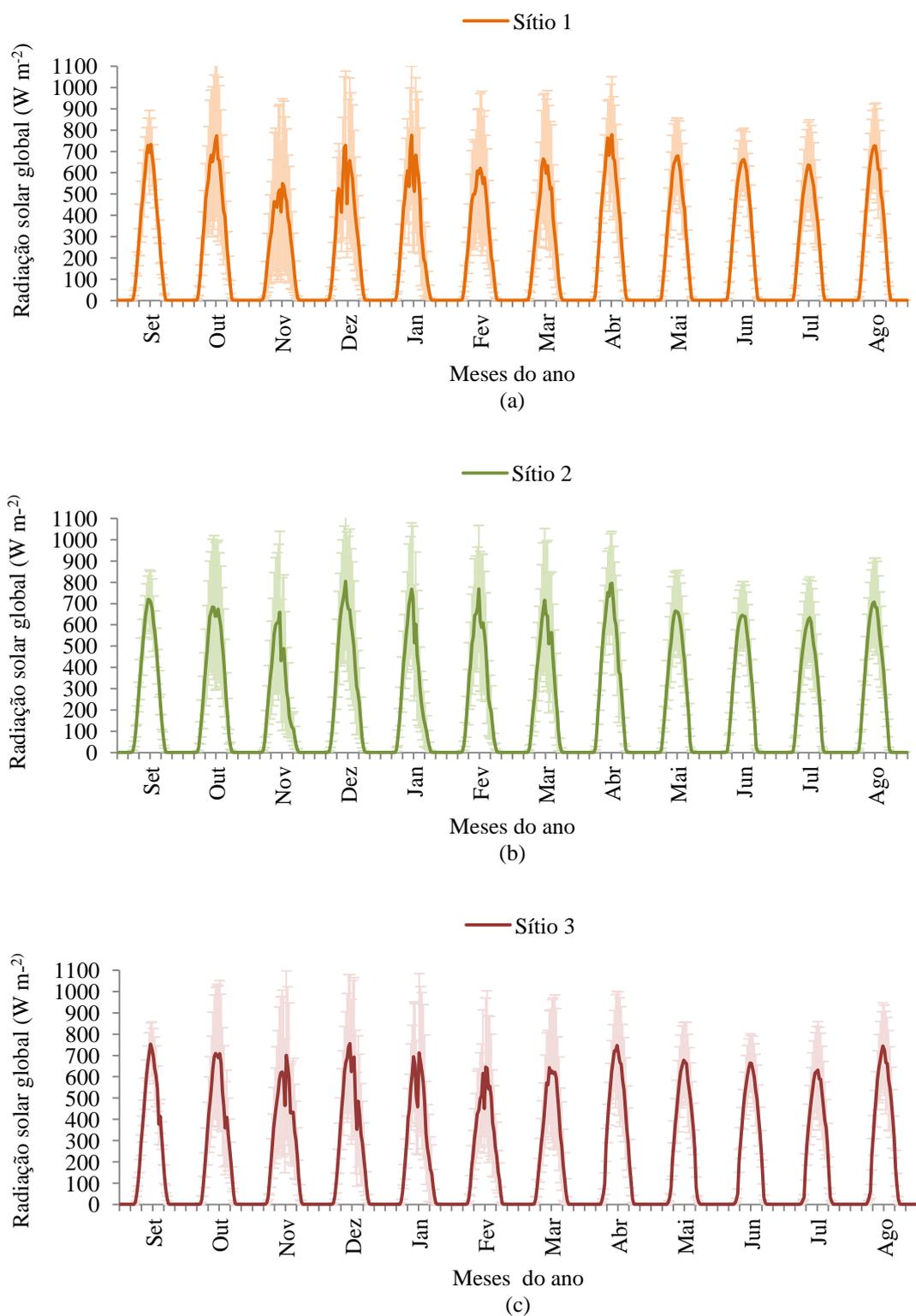


Figura 37 – Ciclo diário médio mensal (\pm DP) da R_g (W m^{-2}) de setembro de 2010 a agosto de 2011 nos Sítios 1 (a), 2 (b) e 3 (c)

Comportamento semelhante foi observado no Sítio 2 (Figura 37). A radiação média anual foi de $360,37 \pm 241,94 \text{ W m}^{-2}$ ou $16,63 \pm 4,03 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, ligeiramente inferior a avaliada no Sítio 1. Notou-se efeito da diminuição da radiação solar da estação úmida para a seca, com média e desvio padrão (DP) de $359,83 \pm 41,66 \text{ Wm}^{-2}$ e $372,64 \pm 16,64 \text{ Wm}^{-2}$, respectivamente, o que representa redução de aproximadamente 3,43% entre esses períodos. Os padrões mensais de R_g indicam menor incidência de radiação solar em novembro com $290,71 \pm 215,39 \text{ W m}^{-2}$ ou $14,15 \pm 4,55 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ e maior em Abril, com $417,89 \pm 268,03 \text{ W m}^{-2}$ ou $18,45 \pm 2,54 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, comportamento análogo ao observado no Sítio 1. Para o ciclo diurno da radiação solar, observa-se que na estação seca, a máxima amplitude e valor médio horário foram observados em setembro ($742,59 \text{ W m}^{-2}$), enquanto na úmida, em dezembro ($869,46 \text{ W m}^{-2}$). O comportamento na estação úmida diverge da observada no Sítio 1, onde a máxima amplitude e valor médio horário foi observado em janeiro.

A radiação média anual observada no Sítio 3 foi de $361,01 \pm 240,22 \text{ Wm}^{-2}$ ou $16,66 \pm 4,00 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, ligeiramente inferior e superior aos avaliados nos Sítios 1 e 2, respectivamente. Observou-se o efeito da diminuição da radiação solar entre a estação úmida e seca, com média e desvio padrão (D) de $361,79 \pm 25,21 \text{ W m}^{-2}$ e $368,63 \pm 20,81 \text{ W m}^{-2}$ respectivamente, o que representa redução de aproximadamente 1,85% entre os períodos, a menor observada entre os sítios estudados. Com relação aos padrões mensais de R_g , observou-se menor incidência de radiação solar em junho, com $342,40 \pm 228,07 \text{ W m}^{-2}$ ou $14,72 \pm 5,01 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ e maior em abril, com $404,66 \pm 263,00 \text{ W m}^{-2}$ ou $17,87 \pm 2,63 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, comportamento este que diverge do observado nos Sítios 1 e 2, onde a menor incidência de radiação foi observada no mês de novembro. Este fato pode estar associado à diferença de nebulosidade entre as regiões e a própria orientação solar que cada sítio apresenta. Para o ciclo diurno da radiação solar, observa-se que na estação seca, a máxima amplitude e valor médio horário foram observados em agosto ($771,91 \text{ W m}^{-2}$), enquanto na úmida, em abril, ($818,54 \text{ W m}^{-2}$). O comportamento da estação seca diverge da observada nos Sítios 1 e 2, onde os valores máximos foram observados em setembro. Por outro lado, o comportamento na estação úmida acompanha a verificada no Sítio 1, mas diverge da observada no Sítio 2, onde o máximo foi observado em dezembro. O comportamento na estação úmida diverge

tanto do observado no Sítio 1 quanto no 2, onde as máximas amplitudes e valores médios horários foram observados em janeiro e dezembro, respectivamente.

O valor médio anual observado nos sítios se aproxima do valor médio observado na região sul do estado de Rondônia, Ji-Paraná de $16,8 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ (CULF et al., 1996). No entanto, é superior ao observado por Biudes (2008) que encontrou média anual de $12,60 \pm 3,1 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ em região de pastagem localizada no norte do Pantanal Matogrossense. Gomes (2010) encontrou para o ano de 2007 valores médios de $353,66 \text{ W m}^{-2}$ em uma estação posicionada na região central da cidade de Cuiabá-MT. O valor está muito próximo da média avaliada nos Sítios 1, 2 e 3. A menor incidência em seu trabalho foi em junho com $303,83 \text{ W m}^{-2}$ e maior, em dezembro $414,39 \text{ W m}^{-2}$, valores próximos aos determinados neste trabalho (Tabela A em anexo). No entanto, há divergência quanto ao meses de ocorrência da menor e maior incidência de radiação solar. A título de comparação, Ferreira (2010) observou a variação sazonal da radiação solar incidente em São Paulo e verificou valor máximo de $18,22 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ em setembro e um mínimo de $10,04 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ em maio.

Como os sítios se localizam na mesma latitude, as diferenças verificadas nos valores de R_g podem ser atribuídas ao fator nebulosidade, visto que a presença de nuvens provoca redução do fluxo radiativo em virtude da alternância de períodos com nebulosidade e céu limpo. As diferenças também podem ser atribuídas à orientação solar que cada edifício apresenta dentro de cada sítio, bem como a presença de diferentes tipos e portes da vegetação. Estes fatores são responsáveis por bloquear a penetração de radiação solar dentro do ambiente onde as estações meteorológicas estavam instaladas, principalmente no início da manhã e no final da tarde, o que pode explicar as diferenças de comportamento verificado nos valores médios e máximos tanto em termos de intensidade quanto em termos de período de ocorrência em cada sítio, mas principalmente nos valores dos desvios padrões observados na Figura 37 e Tabela A em anexo.

Observa-se que existe a tendência de declínio nos valores das médias mensais de R_g no período da seca, entre maio e julho, devido ao Solstício de inverno, bem como a diminuição da presença de nuvens no período, em virtude do fenômeno de estiagem (Figura 38). Exceção se faz durante a passagem das friagens, fenômeno

de escala sinótica, que provocam queda brusca em R_g devido a presença de nebulosidade proveniente da penetração de frente fria, conforme destaca Fisch (1996). Outro aspecto importante a ser considerado é a presença de queimadas que se acentuam durante o período de seca, o que corroborou para diminuir a radiação solar incidente na região. Conforme destacam Artaxo et al. (2002), durante este período do ano a composição química da atmosfera sofre grandes modificações devido a emissão de gases traço e partículas de aerossóis. Na região, os meses de agosto a outubro foram os que mais estiveram sobre os efeitos do espalhamento radioativo provocado pela presença de fumaça, o que pode ter provocado significativas alterações na radiação solar incidente e no balanço de radiação atmosférico.

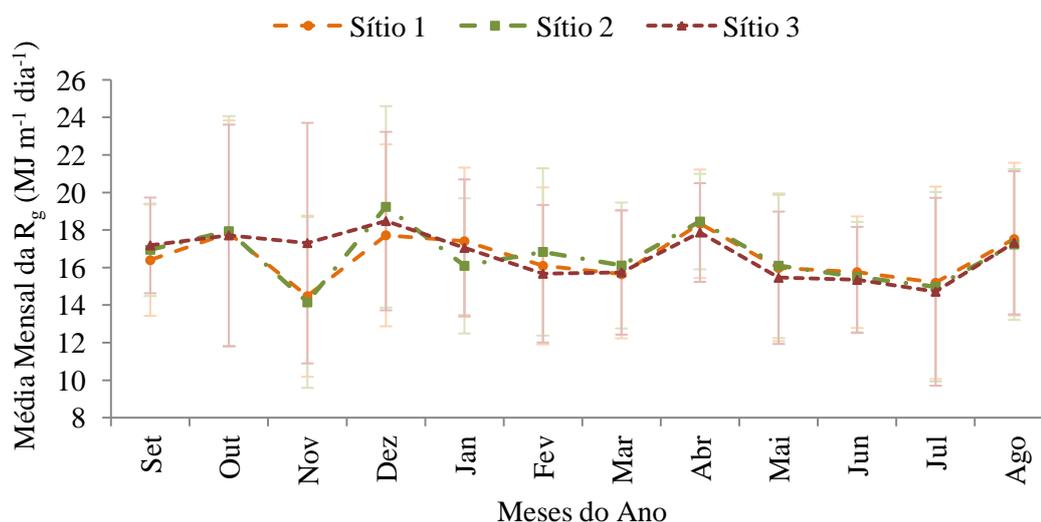


Figura 38 – Média diária mensal (\pm DP) da radiação solar incidente diária nos Sítios 1, 2 e 3

5.2.2.1 Comparação com as Normais Climatológicas (1961-1990)

Os dados médios de radiação solar incidente não foram avaliados em INMET (2009), o que impossibilitou análise comparativa com os dados coletados neste trabalho.

5.2.2.2 Comparação Interurbanas entre os Sítios

O teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) indicou que as distribuições de R_g nos sítio estudados não apresentaram distribuição normal, o que levou a utilização do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis com a finalidade de comparar

estatisticamente os resultados encontrados nas observações realizadas nos sítios urbanos. A estatística de Kruskal-Wallis para a variável radiação solar (R_g) para o período estudado demonstrou não haver diferença significativa entre as R_g das áreas de estudo ($p > 0,05$), tanto na estação seca quanto na úmida (Tabela B em anexo). Apesar de não haver diferenças estatísticas entre a radiação solar nos sítios pesquisados, foram observadas diferenças mensais entre os valores de radiação solar entre as áreas de estudo, sendo estas apresentadas na Figura 39 e discutidas na sequência.

As diferenças observadas entre os Sítios 1-2, 1-3 e 1-4 se deram em virtude da nebulosidade e da orientação dos sítios em cada região do estudo. É importante destacar que foram verificados sombreamentos nos sensores que estavam posicionados ao norte, principalmente nos meses de novembro a janeiro, meses em que a declinação solar foi superior a latitude local. Como se pode perceber, neste período não há um comportamento sazonal padrão que pode ser destacado entre os sítios. Nos meses de fevereiro a maio no Sítio 1 foi registrado menor radiação solar que o Sítios 2 e 3. Nos meses de fevereiro a julho, o Sítio 3 registrou maior radiação solar que o Sítio 2. Nos meses de junho a agosto, o Sítio 1 registrou maior radiação solar que o 2 e em agosto no Sítio 3 foi avaliado maior radiação que no Sítio 2. As maiores diferenças foram observadas no mês de novembro, atingindo $64,95 \text{ W m}^{-2}$ entre os Sítios 2-3 e $58,23 \text{ W m}^{-2}$ entre os Sítios 1-3 (Figura 39).

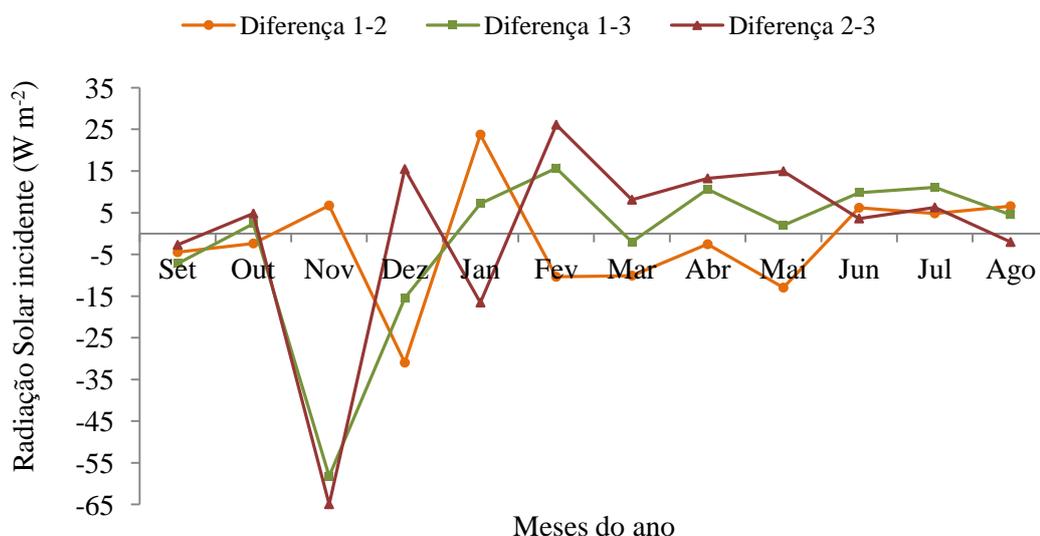


Figura 39 – Diferenças interurbanas entre as médias da radiação solar mensais

5.2.3 Temperatura e Umidade do Ar

O Sítio 1 foi o que apresentou maior média anual de temperatura 28,24°C entre os sítios estudados. As médias da estação seca e úmida foram de 27,85°C e 28,50°C, respectivamente. A maior média mensal foi observada em setembro com 32,83°C e a menor em julho com 26,30°C. A máxima média horária ocorreu em setembro às 14h (38,97°C), e a mínima em junho, às 6h (20,66°C). As maiores e menores amplitudes mensais de temperatura do ar foram observadas em agosto (12,29°C) e março (7,44°C), respectivamente (Figura 40a, Tabela C em anexo).

No Sítio 2, a média anual de temperatura foi igual a 27,84°C, inferior a observada no Sítio 1. Na estação seca e úmida, as médias mensais foram de 27,29°C e 28,21°C. A maior média mensal foi avaliada em setembro com 32,02°C e menor em junho com 25,69°C. A máxima média horária ocorreu em setembro às 14h (38,84°C) e a mínima em junho, às 6h (19,61 °C). As maiores e menores amplitudes mensais de temperatura do ar foram verificadas nos meses de agosto (13,87°C) e março (7,74°C), respectivamente. O Sítio 2 apresentou marcha diária de temperatura do ar muito semelhante a apresentada pelo Sítio 1, com ligeira redução em relação as suas médias. É possível perceber que na estação da seca, durante o período noturno que as médias horárias se afastaram das médias observadas no Sítio 1 e 3 (Figura 40b, Tabela C). Neste sítio observou-se as maiores amplitudes máximas e mínimas.

No Sítio 3, a temperatura média anual foi de 27,69°C, a menor entre os três sítios pesquisados. Este fato se refletiu na estação seca e úmida, com média de 27,53°C e 27,81°C, respectivamente. A maior média mensal foi verificada em setembro (32,33°C) e a menor em junho (26,01°C). A máxima e mínima média horária ocorreram em setembro às 15h (38,46°C) e em junho às 6h (20,56 °C), respectivamente. As maiores e menores amplitudes mensais de temperatura foram verificadas nos meses de agosto (11,78°C) e março (7,34°C), respectivamente (Figura 40c, Tabela C em anexo). O Sítio 3 apresentou marcha diária de temperatura do ar muito semelhante a apresentada pelos Sítios 1 e 2. Com relação ao Sítio 1, houve redução entre as médias apresentadas. Por outro lado, quando comparado com o Sítio 2, constata-se que a temperatura média na estação seca foi superior, e na estação úmida, ligeiramente inferior. Em termos de maior e menor média mensal, ambas

foram superiores as observadas no Sítio 2. Assim como no Sítio 1, em termos de máxima e a mínima média horária, a primeira foi inferior, e a segunda, superior.

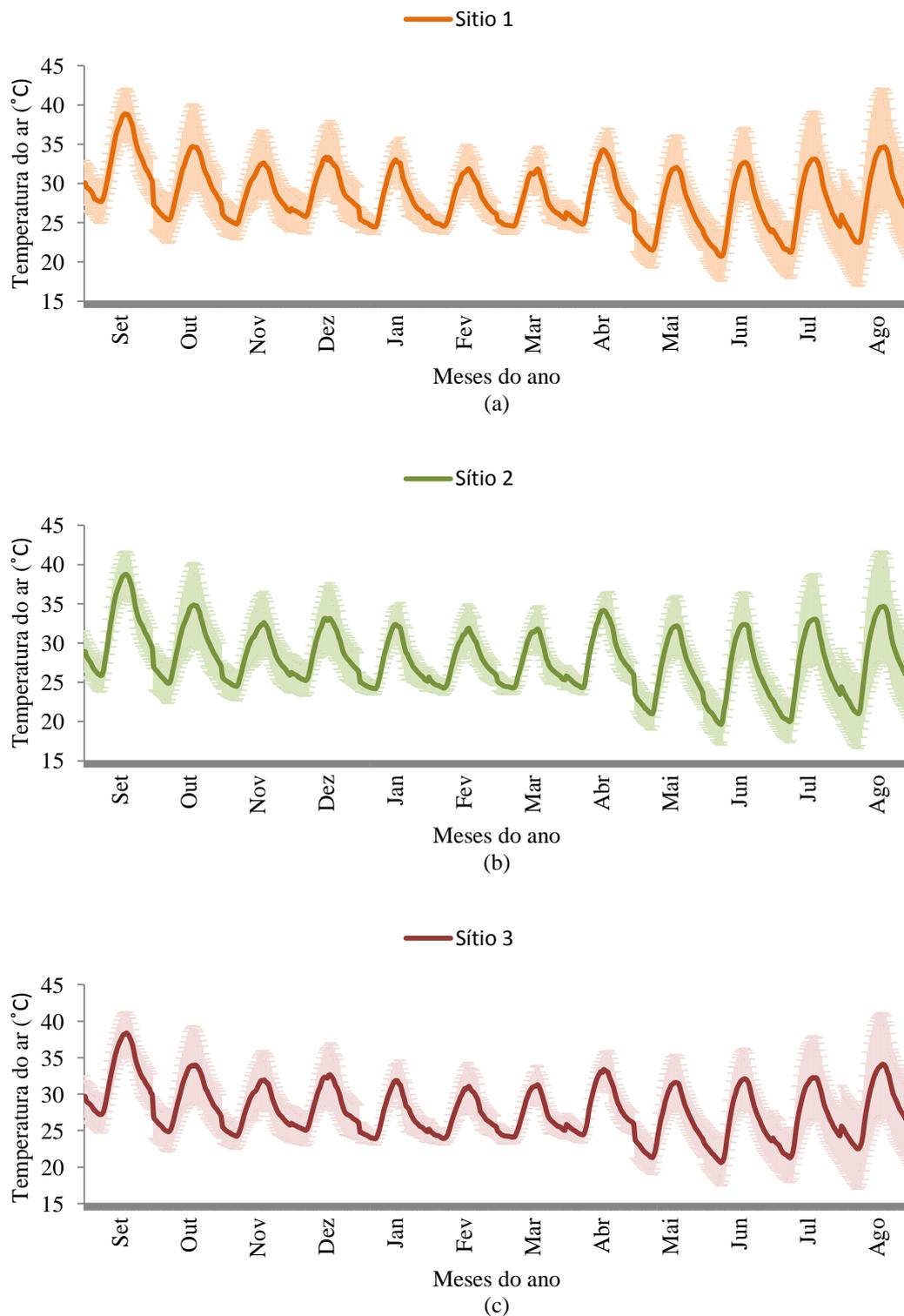


Figura 40 – Ciclo diário médio mensal (\pm DP) da temperatura do ar de setembro de 2010 a agosto de 2011 nos Sítios 1 (a), 2 (b) e 3 (c)

Os resultados encontrados estão coerentes com os observados por Gomes (2010) que verificou, no ano de 2007, média anual de temperatura igual a 27,52°C e média na estação úmida e seca de 27,73°C e 25,64°C, respectivamente. A maior média mensal foi verificada em setembro (30,5 °C) e menor em julho (24,48°C). A máxima média horária foi registrada em setembro (36,28°C) às 15h e a mínima (19,5°C) em julho às 7h. Como se pode perceber, todas as médias encontradas em 2007 foram inferiores às observadas em 2010/11. Em trabalho realizado em área de pastagem no ano de 2007, Biudes (2008) encontrou média anual de 25,75°C e média de 27,1°C e 24,3°C nas estações úmida e seca, respectivamente. A maior média mensal foi verificada em setembro (28,3 °C) e menor em julho (22,60°C). Os valores são inferiores aos observados por Gomes (2010) e aos apresentados neste trabalho, justificados pelo fato de se tratar de área situada em ambiente rural.

Em se tratando de umidade relativa, o Sítio 1 foi o que apresentou menor média anual de UR (64,77%). As médias na estação seca e úmida foram de 54,57% e 71,84%, respectivamente. A máxima média mensal foi observada em março (81,77%) e a mínima em setembro (39,22%). A máxima média horária ocorreu em março (92,78%) às 6h e a mínima em setembro (25,50%) às 14h. As maiores e menores amplitudes mensais de UR foram verificadas nos meses de junho (41,01%) e setembro (26,07%), respectivamente (Figura 41a e Tabela C em anexo).

No Sítio 2, a média anual de UR foi de 67,38%, superior a observada no Sítio 1. As médias na estação seca e úmida foram de 57,36% e 74,18%, respectivamente. A máxima média mensal aconteceu em março (83,50%) e a mínima em setembro (32,02%). A máxima média horária ocorreu em março (94,46%) às 6h e a mínima em setembro (25,14%) às 15h. As maiores e menores amplitudes mensais de UR foram verificadas nos meses de junho (46,22%) e fevereiro (28,70%), respectivamente. O Sítio 2 apresentou marcha diária da umidade do ar muito semelhante a apresentada pelo Sítio 1, com elevação de suas médias em relação as observadas no Sítio 1. É possível perceber que na estação seca, durante o período noturno que as médias horárias se afastaram das médias observadas no Sítio 1 e 3 (Figura 41b, Tabela C em anexo).

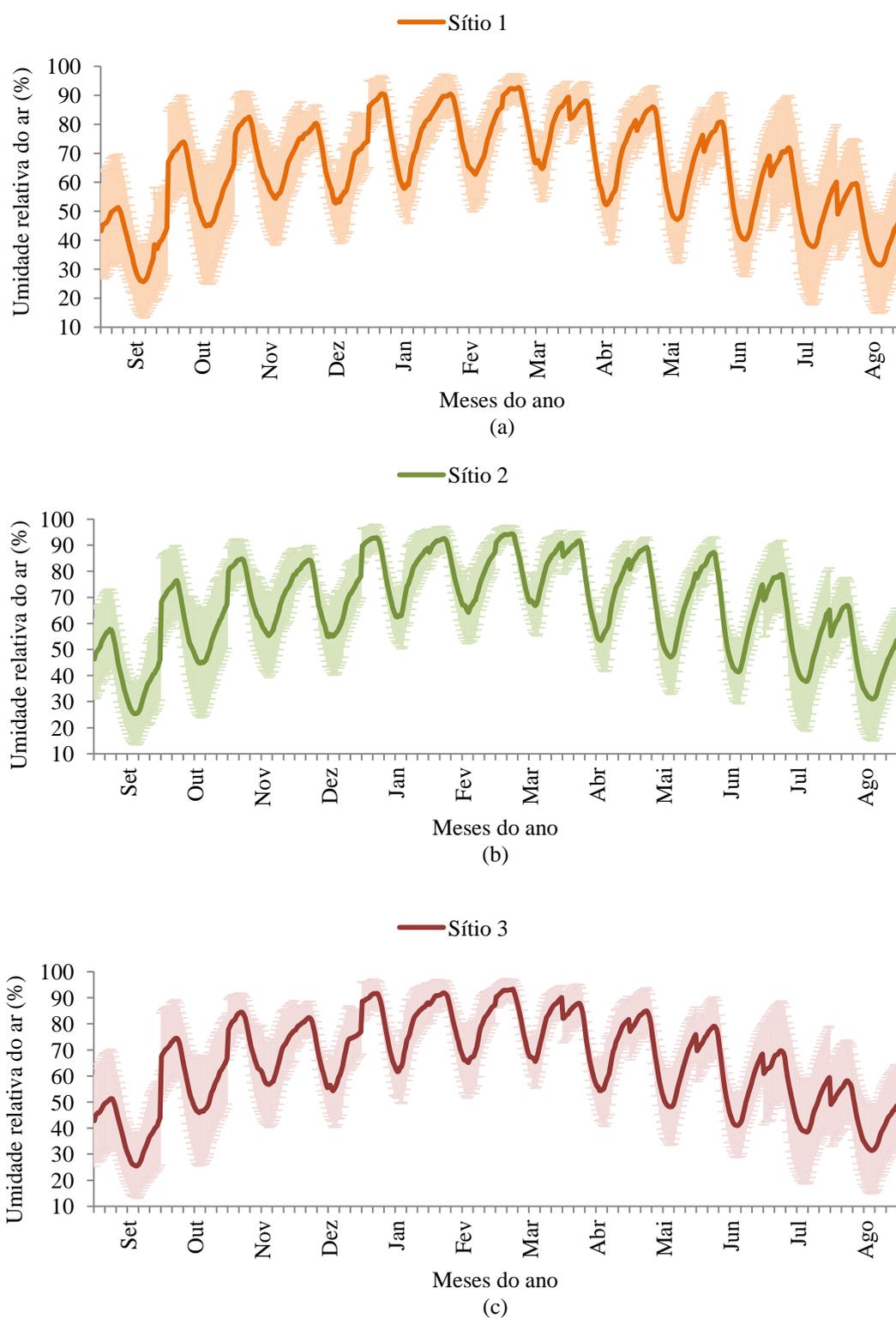


Figura 41 – Ciclo diário médio mensal (\pm DP) da umidade do ar de setembro de 2010 a agosto de 2011 nos Sítios 1 (a), 2 (b) e 3 (c)

O Sítio 3 apresentou média anual de UR de 65,88%, e médias nas estações seca e úmida de 54,19% e 73,84%, respectivamente. A máxima média mensal foi observada em março (82,81%) e a mínima em setembro (38,87%). A máxima média horária ocorreu em março (93,49%) às 6h e mínima em setembro (25,32%) às 15h. As maiores e menores amplitudes mensais de temperatura foram verificadas nos meses de junho (38,47%) e fevereiro (26,18%), respectivamente. Pode-se afirmar que o Sítio 3 apresentou comportamento similar aos Sítios 1 e 2, sendo que mesmo apresentou médias superiores as observadas no Sítio 1 e inferiores as observadas no sítio 2. As amplitudes foram as menores observadas entre os sítios pesquisados (Figura 41c, Tabela C em anexo).

Gomes (2010) encontrou para o ano de 2007 média anual da umidade relativa igual a 68,83% e média na estação seca e úmida de 59,23%, e 73,14%, respectivamente. De acordo com o autor, a UR apresentou sazonalidade característica com a máxima média mensal em fevereiro (78,1%) e a mínima em setembro (40,7%). A máxima média horária foi em fevereiro (88,7%) e a mínima média horária em setembro (26,86%). Tanto a média anual quanto as médias na estação seca e úmida avaliadas pelo autor foram superiores à observada nos sítios pesquisados. Por outro lado, a máxima média mensal foi inferior, enquanto que a mínima foi superior. Em se tratando de máxima e mínima média horária, constata-se que a primeira foi inferior e a segunda foi superior. Biudes (2008) encontrou média anual de 69,30% e média de 64% e 74% nas estações seca e chuvosa, respectivamente. A maior média mensal foi verificada em fevereiro (80,10%) e a menor em setembro (47,0%). A menor média mensal é superior à observada por Gomes (2010) e às determinadas nesta pesquisa, justificados pelo fato de se tratar de área situada em ambiente rural, onde devido à menor taxa de impermeabilização, há maior disponibilidade de água no meio. O Sítio 2, apesar de urbano, apresenta comportamento semelhante ao rural avaliado por Biudes (2008).

As diferenças observadas nos registros podem ser atribuídas às diferentes características urbanas verificadas dentro e no entorno de cada sítio e seu posicionamento dentro da cidade. O sítio mais central (1) se caracterizou por apresentar maior média de temperatura e menor média de umidade. O sítio menos periférico (2) menor temperatura que o mais central (1) e maior que o mais periférico

(3). No entanto, sua umidade média anual foi superior à registrada nos Sítios 1 e 3 em virtude da maior quantidade de vegetação presente dentro deste sítio. O sítio mais periférico (3) foi o que apresentou menor média de temperatura apesar de sua umidade ser ligeiramente inferior a registrada no sítio menos periférico (2).

Como as diferenças observadas são pequenas, caso se objetive instalar uma estação meteorológica com finalidade de caracterizar o macroclima de uma cidade, esta deve ser posicionada em região central da cidade a uma altura superior ao nível médio do dossel urbano (pelo menos 1,5 a altura média dos edifícios e obstruções no seu entorno), com vistas a eliminar as interferências no fluxo de vento ocasionadas pela presença das edificações e árvores (Item 5.2.4).

Outro aspecto importante a ser considerado é que o local de instalação deve ser representativo da região em estudo. Por isso, deve-se evitar que o entorno do local de instalação não apresente características de uso e ocupação do solo semelhantes às preponderantes na região de estudo. Recomenda-se evitar avaliar o macroclima da cidade através de estações meteorológicas convencionais. Os dados coletados nas mesmas podem não ser representativos do comportamento observado na cidade em virtude das modificações a que estão impostas o entorno destes sítios convencionais (grama e ausência de obstrução).

A estação do INMET utilizada na avaliação das normais climatológicas se localiza em região distante do centro da cidade e posicionada em local próximo ao rio Cuiabá. Estes fatores podem induzir modificações na representatividade macroclimática dos registros das variáveis meteorológicas visto que a atual posição de coleta dos dados não representa com fidedignidade o comportamento verificado nas áreas urbanizadas da região central da cidade de Cuiabá.

5.2.3.1 Comparação com as Normais Climatológicas (1961-1990)

As médias mensais observadas entre os períodos de setembro de 2010 a agosto de 2011 são apresentadas na Figura 42 juntamente com as médias observadas na Estação Meteorológica do Aeroporto Marechal Rondon para o mesmo período, com as médias avaliadas na análise macroclimática de Cuiabá-MT, realizada por Campelo et al. (1991) e Normais Climatológicas da Cidade avaliadas pelo INMET (2009).

Observa-se que os dados avaliados nos Sítios 1, 2 e 3 apresentam comportamento similar ao observado na Estação do Aeroporto, apesar das médias observadas nas primeiras serem superiores às observadas na segunda. Este comportamento está associado principalmente ao local onde a estação convencional do aeroporto foi instalada, com pouca presença de edificações, o que favorece as trocas turbulentas, diferentemente dos locais onde as estações meteorológicas foram instaladas nos sítios urbanos, com presença de edifícios e pouca vegetação.

Ao se comparar os dados médios mensais de temperatura avaliados nos sítios urbanos com médias históricas de 1961 a 1990, observa-se que tanto no período úmido (outubro a abril) quanto no seco, os pontos se mantiveram acima das médias históricas, onde se conclui que o ano em análise foi mais quente que o determinado pelas normais. As maiores diferenças foram avaliadas no período seco, com destaque para setembro no Sítio 1, com diferença de 6,23°C. Nos meses úmidos, as diferenças se reduziram, com maior diferença observada também no Sítio 1 no mês de abril (2,85°C).

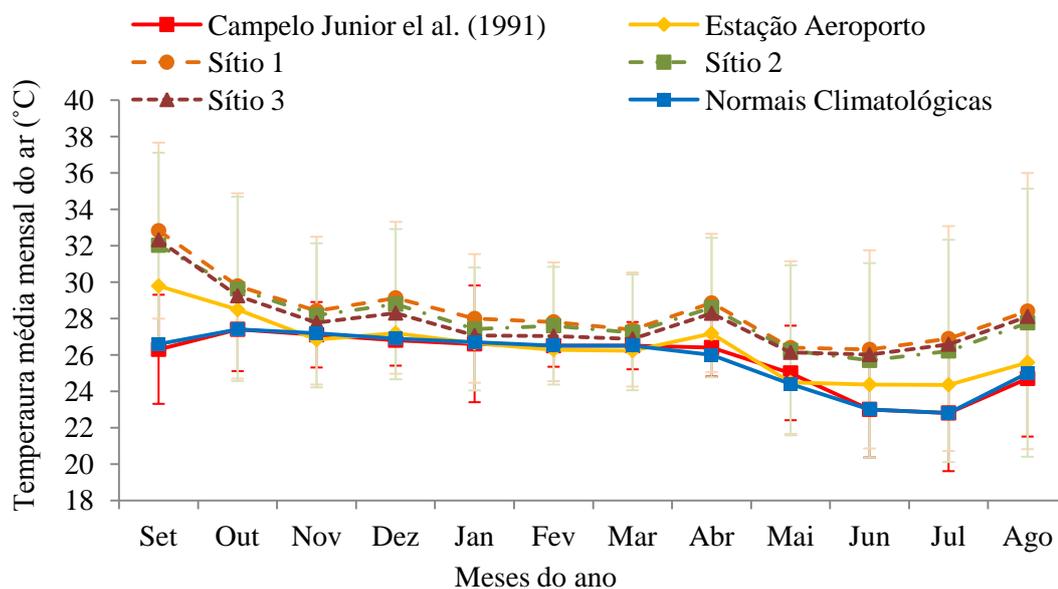
Os pontos das médias mensais da variável umidade relativa se mantiveram abaixo das médias históricas, com exceção do mês de março, onde estas foram superiores. Conclui-se também que o ano em análise foi mais seco que o apresentado pelas normais climatológicas. As maiores diferenças entre as médias históricas foram observadas na estação da seca, com destaque para o mês de setembro no Sítio 3 (-22,90%). Nos meses úmidos, as diferenças se reduziram, com diferença positiva (sítio urbano mais úmido) observada também no Sítio 3 no mês de março (+1,80%).

É certo que em parte as diferenças observadas se dão em virtude características entre a estação convencional do INMET e as estações meteorológicas instaladas em cada sítio. Devido à presença de grama no entorno da estação convencional e ausência de obstrução a uma distância mínima de 10 vezes a altura de qualquer obstáculo presente no entorno (WMO, 1996), o deslocamento do plano zero sobre o terreno nas estações convencionais são menores que 0,66m (OKE, 1987), valores estes inferiores ao observado nos sítios urbanos estudados (2,13 à 2,73m, Tabela 11). Este fato se traduz em menor penetração de ventos dentro do dossel urbano, diminuindo as trocas turbulentas e por isso alterando o registro das variáveis meteorológicas nos sítios urbanos.

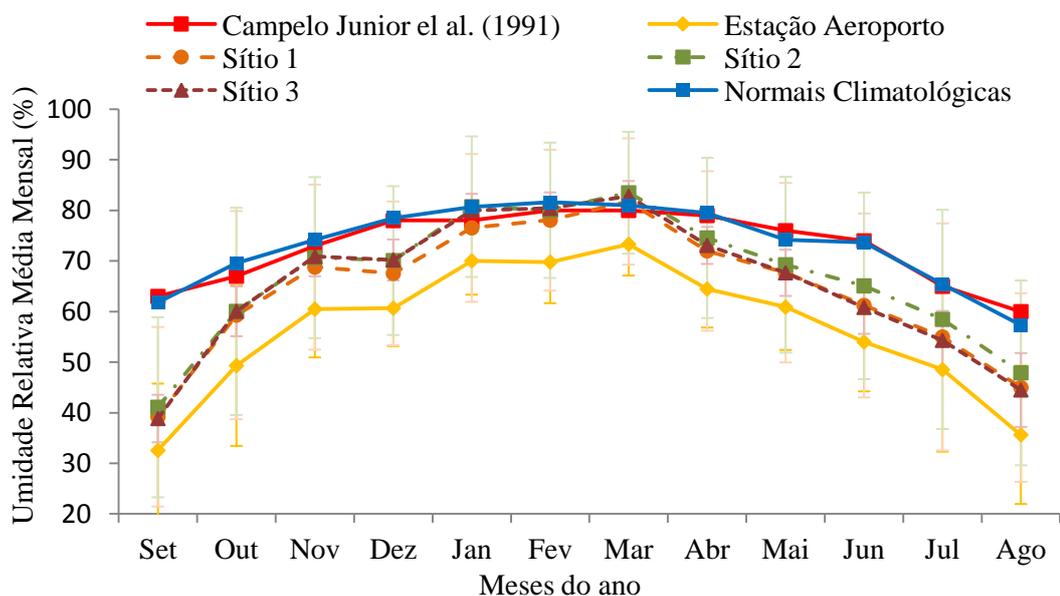
Por outro lado, não se pode descartar as profundas modificações pelas quais passou a cidade de Cuiabá entre os anos de 1961 a 2010 (evolução urbana de Cuiabá - item 3.3). A população e o perímetro urbano, que em 1960 eram de 45. habitantes e 4,5 km², em 2010 passaram a ser de 551.310 habitantes e 251,94km², respectivamente. Em estudo comparativo realizado no perímetro urbano de Cuiabá-MT, Callejas et al. (2011d) demonstraram que a área vegetada em 1986 ocupava 55,68% do atual perímetro urbano. Em contrapartida, em 2007, esta área foi reduzida em 33,75%, passando a ocupar apenas 21,93%. Em sentido oposto, as áreas construídas, que eram responsáveis por 24,45% da área do perímetro urbano, passaram a ocupar 52%, crescimento de aproximadamente 27,55%. Demonstrou-se que grande parte das alterações por qual passou a cidade se deu principalmente nas ultimas duas décadas, entre os anos de 1986 e 2007.

O estudo também avaliou a temperatura superficial dentro do perímetro urbano, indicando que a mesma se elevou, com destaque para as áreas urbanizadas, que sofreram elevação em média de 1,02°C no período. O intenso crescimento e concentração populacional constatados no estudo favoreceram o processo acelerado de mudanças ambientais na região, provocado principalmente pelas alterações nas coberturas das superfícies do solo, ou seja, pela substituição das enormes áreas naturais preservadas em seu entorno por áreas construídas e impermeabilizadas. Estas modificações podem ter sido responsáveis por profundas mudanças no balanço de energia da cidade, causando, dentre outras consequências, influência na dinâmica do movimento do ar, aumento da temperatura nas cidades e o fenômeno da Ilha de Calor Urbana (AYOADE, 2001; SANT'ANNA NETO, 2000; MENDONÇA, 2000).

Aliado aos fatos descritos, soma-se as constantes queimadas que têm sido observadas no período de seca na região que têm influenciado de forma significativa o balanço de energia nas áreas centrais e do entorno da cidade. Diante do exposto, os indícios apresentados indicam que as médias históricas avaliadas na estação seca entre os anos de 1961 e 1990 possam ter sofrido modificações em virtude do processo de urbanização pelo qual a cidade de Cuiabá passou nos últimos 20 anos. No entanto, os fatos apresentados somente poderão ser ratificados a partir da avaliação das novas normais climatológicas para o período de 1991 a 2020 ou através de uma nova caracterização macroclimática na região.



(a)



(b)

Figura 42 – (a) Temperatura média mensal do ar \pm DP e (b) umidade relativa média mensal do ar \pm DP (b) para os Sítios 1, 2 e 3, Estação Aeroporto, Campelo Junior et al. (1991) e Normais Climatológicas (1961-1990)

5.2.3.2 Comparação Interurbanas entre os Sítios

O teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) indicou que as distribuições de temperatura e umidade do ar para os Sítios 1, 2 e 3 não apresentaram distribuição normal, o que levou a utilização do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis com a finalidade de comparar estatisticamente os resultados encontrados nas observações dos sítios pesquisados. A estatística de Kruskal-Wallis para a variável temperatura e umidade do ar indicou em quase todos os testes que existe diferença significativa entre os Sítios 1-2, 1-3 e 2-3 ($p < 0,05$), tanto na estação seca quanto na úmida (Tabela B anexa). Exceção aconteceu entre a temperatura entre os Sítios 2-3 e a umidade do ar entre os Sítios 1-3 na seca, onde não houve diferenças significativas.

Ao se analisar a Tabela 12, observa-se que a maior diferença média anual entre os sítios foi verificada entre o mais central e o mais periférico (1-3), seguida da diferença entre o sítio mais central e menos periférico (1-2) e finalmente entre os sítios periféricos (2-3). O sítio mais central sempre esteve mais quente que os periféricos, enquanto os periféricos alternaram de comportamento durante o período seco e úmido (Tabela 12 e Figura 43). O comportamento observado ratifica a premissa de que a intensidade de Ilha de Calor aumenta das áreas periféricas para as áreas centrais, onde ocorre adensamento urbano, intenso tráfego de veículos, diminuição das áreas verdes e permeáveis (OKE, 1987). Em termos de diferenças mensais, as maiores foram observadas no mês de janeiro ($0,93^{\circ}\text{C}$) entre os Sítios 1-3, no mês de setembro ($0,80^{\circ}\text{C}$) entre os Sítios 1-2 e em fevereiro ($0,57^{\circ}\text{C}$) entre os Sítios 2-3. As menores diferenças foram observadas no mês de maio para todos os sítios estudados. O Sítio 3, mais próximo da área rural, em grande parte do período seco esteve mais quente que o Sítio 2 e por este motivo se observa a diferença negativa entre os meses de junho a setembro (Figura 43a). Justifica-se esse comportamento devido a maior presença de vegetação encontrada no entorno do Sítio 2 e maior presença de área impermeável dentro do Sítio 3. Ao se dividir a diferença entre temperatura média anual entre o sítio mais central e os periféricos pela distancia entre os mesmos é possível obter as taxa de variação linear da temperatura na cidade: $0,1^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (1-3), direção nordeste e $0,09^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (1-2), direção oeste. Nos meses de maiores diferenças, as taxas se elevam para $0,18^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (1-3) em janeiro e $0,19^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (1-2) em setembro.

Sob o aspecto da umidade relativa, observa-se que a maior diferença média anual entre os sítios foi verificada entre o mais central e o menos periférico (1-2), seguida da diferença entre o sítio mais central e mais periférico (1-3) e finalmente entre os sítios periféricos (2-3). A maior diferença de umidade verificada entre os Sítios 1 (mais seco) e 2 (mais úmido) se deve ao fato da maior presença de vegetação presente no entorno do último, que em virtude da evaporação, bem como da transpiração da plantas, que elevaram a umidade no meio, principalmente durante o período noturno (Figura 43b). O sítio mais central (1) sempre esteve menos úmido que o sítio menos periférico (2) (Tabela 12 e Figura 43). Por outro lado, quando comparado com o mais periférico (3), observa-se que durante o período úmido e seco, o Sítio 1 esteve menos e mais úmido, respectivamente. Este comportamento pode ser justificado pela maior irrigação durante o período de seca dos jardins nas residências e canteiros centrais no sítio mais central do que o periférico. Outro fato que corrobora para este comportamento é a maior proximidade do Sítio 3 à áreas com solo total e parcialmente expostos (área rural), que em virtude da maior exposição dos mesmos a radiação solar, perdem umidade de forma mais rápida se comparados a aqueles que estão cobertos por vegetação.

Tabela 12– Diferenças médias mensais interurbanas entre a temperatura e umidade relativa do ar entre os Sítios 1, 2 e 3

Meses	Diferença 1-2		Diferença 1-3		Diferença 2-3	
	Temp. (°C)	Umidade (%)	Temp. (°C)	Umidade (%)	Temp. (°C)	Umidade (%)
Set	0,80	-1,88	0,50	0,35	-0,30	2,23
Out	0,16	-0,74	0,54	-0,76	0,38	-0,01
Nov	0,26	-1,88	0,67	-2,10	0,41	-0,22
Dez	0,35	-2,52	0,84	-2,65	0,49	-0,13
Jan	0,58	-4,20	0,93	-3,42	0,35	0,77
Fev	0,22	-1,95	0,79	-2,32	0,57	-0,37
Mar	0,15	-1,73	0,52	-1,04	0,37	0,69
Abr	0,26	-2,58	0,57	-1,09	0,31	1,49
Mai	0,15	-1,57	0,26	0,03	0,11	1,60
Jun	0,61	-3,87	0,28	0,40	-0,32	4,27
Jul	0,68	-3,47	0,31	0,68	-0,37	4,15
Ago	0,64	-2,90	0,29	0,49	-0,35	3,39
Estação Seca	0,58	-2,74	0,33	0,39	-0,25	3,13
Estação Úmida	0,28	-2,23	0,69	-1,91	0,41	0,32
Média anual	0,40	-2,61	0,54	-1,11	0,14	1,50

Inversamente ao que aconteceu para a temperatura do ar, o sítio central foi menos úmido do que os periféricos no mês úmido, ratificando a premissa de que à medida que ocorre o adensamento urbano, menores são as áreas permeáveis e vegetadas, menor a disponibilidade de água no meio, reduzindo desta forma a evapotranspiração nesses ambientes, e conseqüentemente, a umidade do ar atmosférico. Assim como para a temperatura, este é um efeito decorrente do fenômeno de Ilha de Calor Urbana. A influência do entorno (área rural) no campo higrométrico da cidade é perceptível nos período seco visto que o Sítio 3 se mostrou menos úmido do que a região central da cidade. Este comportamento foi evidenciado por Callejas et al. (2011a) durante o período seco, em que o meio rural em muitas horas do dia esteve mais seco do que o meio urbano. Dividindo-se a diferença entre umidade relativa média anual entre o sítio mais central e os periféricos pela distância entre os mesmos é possível obter as taxa de variação linear da umidade na cidade: 0,60%/ km (1-2), direção oeste e 0,21%/ km (1-3), direção nordeste. Nos meses com maiores diferenças, as taxas se elevam para 1,00%/km (1-2) e 0,65%/km (1-3), ambas em janeiro.

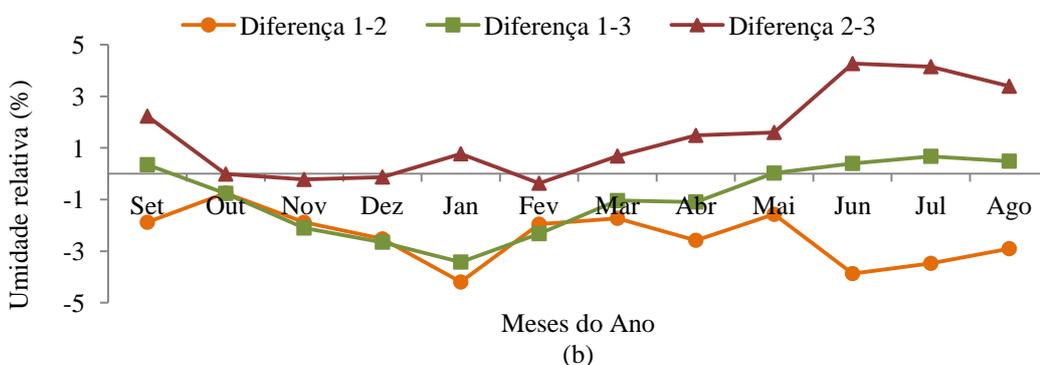
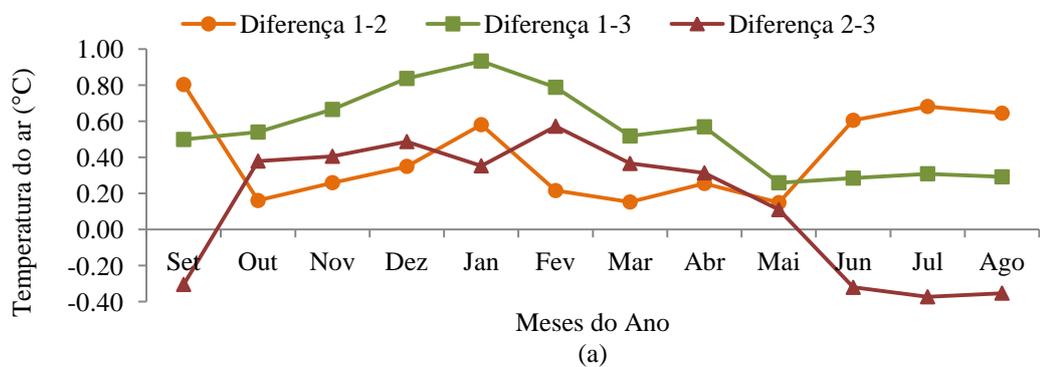


Figura 43 – (a) Diferenças interurbanas entre as médias mensais da temperatura do ar e (b) diferenças interurbanas entre umidade relativa do ar

5.2.4 Velocidade do Ar

O Sítio 1 apresentou média anual intermediária de velocidade do ar de 1,00 m/s. As médias da estação seca e úmida foram de 1,02 m/s e 0,97 m/s, respectivamente. A maior média mensal foi observada em agosto (1,12 m/s) e a menor em abril (0,89 m/s). Em termos de máxima média horária, verifica-se que ela ocorreu em setembro às 12h (1,95 m/s), e a mínima média horária em abril às 2h (0,38 m/s). As maiores e menores amplitudes mensais da velocidade do ar foram verificadas nos meses de setembro (1,49 m/s) e março (0,94 m/s), respectivamente (Figura 44, Tabela D em anexo). Neste sítio foram observadas as maiores amplitudes máximas e mínimas.

No Sítio 2 a média anual de velocidade do ar foi igual a 0,45 m/s, a menor observada entre os sítios. Na estação seca e úmida, as médias foram de 0,46 e 0,44 m/s. A maior média mensal foi avaliada em outubro (0,95 m/s) e a menor em junho (0,36 m/s). A máxima média horária ocorreu em agosto (1,24 m/s) às 13h e a mínima média horária em abril (0,04 m/s) às 1h. As maiores e menores amplitudes mensais da velocidade do ar foram verificadas nos meses de agosto (1,16 m/s) e janeiro (0,64 m/s), respectivamente. Pode-se afirmar que a velocidade do ar no Sítio 2 apresentou marcha diária similar à do Sítio 1. No entanto, a velocidade do ar neste sítio foi consideravelmente inferior ao Sítio 1 (65% inferior na média anual). No mesmo foram observadas as menores amplitudes máximas e mínimas.

No Sítio 3, a média anual de velocidade do ar foi de 1,05 m/s, a maior entre os três sítios estudados. Este fato se refletiu na estação seca e úmida, com média de 1,02 e 1,07 m/s, respectivamente. A maior média mensal foi verificada em setembro (1,19 m/s) e a menor em junho (0,86 m/s). A máxima e mínima média horária ocorreram em setembro (1,91 m/s) às 11h e em abril (0,40 m/s) às 23h, respectivamente. As maiores e menores amplitudes mensais foram verificadas nos meses de agosto (1,29 m/s) e maio (0,78 m/s), respectivamente. Pode-se concluir que o Sítio 3 apresentou marcha diária da velocidade do ar muito semelhante à observada no Sítio 1, inclusive em termos de intensidade. Por outro lado, observa-se marcha diária semelhante e intensidade consideravelmente superior ao Sítio 2 (59% superior a média anual apresentada pelo Sítio 2). Neste sítio foram observadas amplitudes máximas e mínimas intermediárias entre os sítios estudados.

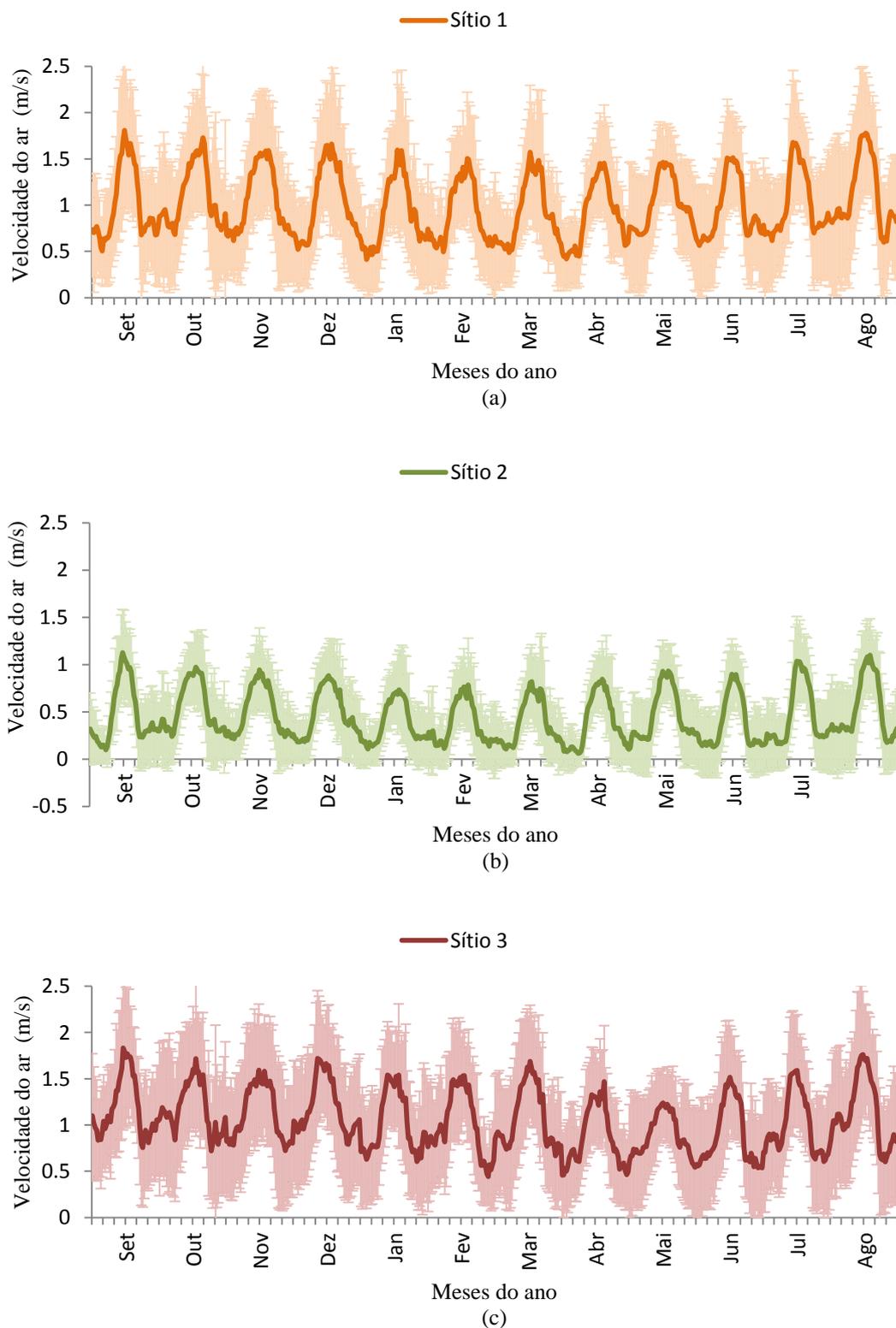


Figura 44 – Ciclo diário médio mensal da velocidade do ar (\pm DP) de setembro de 2010 a agosto de 2011 nos Sítios 1, 2 e 3

Os resultados encontrados divergem dos observados por Gomes (2010) que encontrou média anual de velocidade do ar em 2007 igual a 0,69 m/s e média na estação seca e úmida de 0,63 e 0,76 m/s, respectivamente. A maior média mensal foi verificada em janeiro com 0,88 m/s. e menor em setembro 0,54 m/s. Com exceção do Sítio 2, a média anual e estacionais determinadas em 2007 por Gomes (2010) foram inferiores às observadas em 2010/11. Os meses e os valores de maior e menor média mensal também divergem dos observados nos Sítios 1,2 e 3.

Com relação à direção dos ventos predominantes no Sítio 1 (Figura 45), a maior frequência relativa da direção dos ventos no período úmido de novembro a março foi a norte (N). O vento Sul (S) predominou no período seco de maio a agosto. Nos meses de setembro, outubro e abril houve predomínio do vento norte, sul e oeste, respectivamente. A taxa média anual de calmaria registrada neste sítio foi de 7,33% dos registros anuais.

No Sítio 2, comportamento semelhante foi observado, com ventos Norte (N) predominando entre no período úmido de novembro a março e Sul (S) no período seco entre os meses de abril a agosto. Os meses de setembro e outubro apresentaram predomínio de vento Norte (N) e Sul (S), respectivamente. A taxa média anual de calmaria registrada foi elevada neste sítio, 33,86% dos registros, resultado da sua elevada rugosidade superficial.

Com relação ao Sítio 3, as direções sofreram modificações em relação as observadas nos Sítios 1 e 2. De novembro a abril, houve predominância de vento na direção norte (N) e nordeste (NE) em alguns meses, e em outros, de nordeste (NE) e norte (N). De junho a setembro, o vento nordeste (NE) preponderou sobre o sul (S). Em maio e outubro houve predominância de ventos da direção sudeste (SO). O fato pode ser justificado devido à barreira de vegetação que existe ao sul nas proximidades do ponto de coleta da estação meteorológica. A taxa média anual de calmaria registrada neste sítio foi de 7,09% dos registros anuais.

Os resultados encontrados nos Sítios 1 e 2 ratificam os resultados determinados por Santanna et al. (2008) que observaram que os ventos sul – sudoeste (S – SO) caracterizam as estações de outono e inverno (período de seca), e os ventos norte – noroeste (N – NO) e norte – nordeste (N – NE) predominam durante as estações primavera e verão (período úmido).

As diferenças observadas nos registros podem ser atribuídas às diferentes rugosidades avaliadas em cada sítio. A análise de rugosidade superficial apresentada na Tabela 11 indica que os Sítios 1 e 3 apresentam rugosidade superficial semelhantes, com deslocamento do plano zero igual a 2,12 m. Por outro lado, o Sítio 2 devido a sua declividade acentuada, apresentou rugosidade superior, com deslocamento do plano zero igual 2,72 m. É importante destacar que Método Morfométrico utiliza apenas a altura das edificações na avaliação de z_0 e z_d . O comportamento diferenciado da intensidade do ar observado na Figura 44 pode ser justificado pelo fato de que a rugosidade dos sítios urbanos não está apenas relacionada à presença das edificações, mas também devido à presença de arborização em seu interior. De fato, pelo inventário da arborização realizado nos sítios é possível perceber que as alturas médias das árvores presentes dentro de cada sítio urbano são diferentes, em média 7,96 m de altura no Sítio 1, 10,64 m no Sítio 2 e 8,84 m no sítio 3. Caso elas fossem utilizadas em conjunto com a altura média dos edifícios na avaliação da rugosidade superficial dos sítios, a seguinte ordem de rugosidade seria encontrada: Sítio 2, o mais rugoso, Sítio 1 com rugosidade intermediária e Sítio 3, menos rugoso, ordem esta que coincide com a velocidade média anual e mensais registradas em cada sítio urbano (Tabela D em anexo). É importante destacar que os anemômetros instalados a altura de 5 m ficaram inseridos dentro da camada rugosa, e por este motivo, foram influenciados pela turbulência e alterações dos fluxos de ar impostas pelas edificações e arborizações existentes dentro dos sítios urbanos. O posicionamento dos anemômetros dentro de sítios urbanos é um desafio, pois a regra estabelecida para estações convencionais pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO) de ausência de obstrução a uma distância mínima de 10 vezes a altura de qualquer obstáculo presente no entorno dificilmente é conseguida em ambientes urbanos. E quando ela é, dificilmente este sítio urbano é representativo da região de estudo. Oke (2006) destaca que não há uma regra geral para posicionar os anemômetros dentro de áreas urbanas, mas recomenda que em casos de avaliação da velocidade e direção do vento, os sensores sejam posicionados em um mastro a uma altura de pelo menos 10 m ou 1,5 vezes a altura média dos obstáculos presentes em seu entorno.

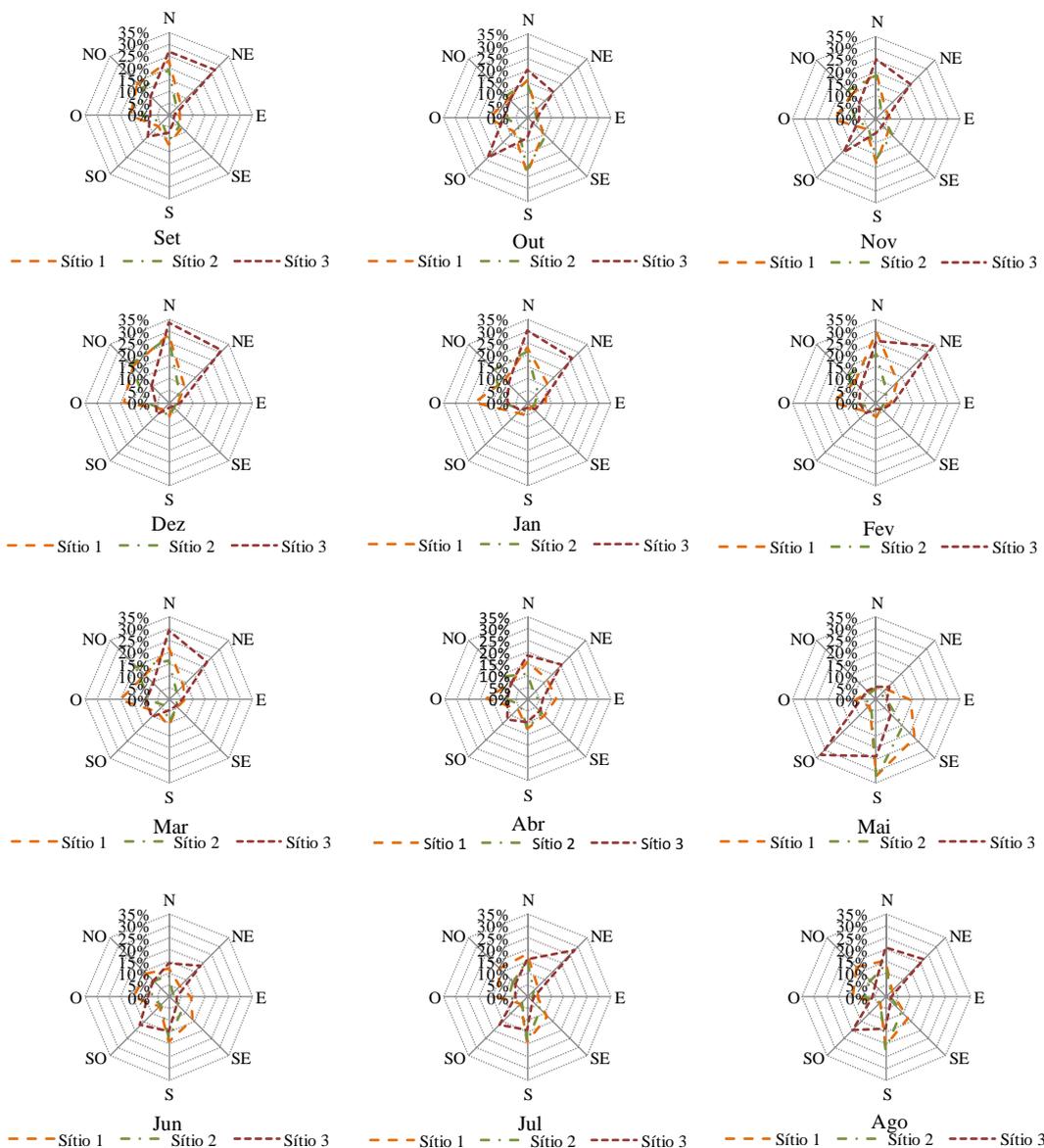


Figura 45 – Frequência relativa média do vento durante os meses do ano para os Sítios 1, 2 e 3

5.2.4.1 Comparação com as Normais Climatológicas (1961-1990)

As médias mensais de velocidade do ar observadas entre os períodos de setembro de 2010 a agosto de 2011 são apresentadas na Figura 46, juntamente com as médias observadas na Estação Meteorológica do Aeroporto Marechal Rondon, na análise macroclimática de Cuiabá-MT, realizada por Campelo et al. (1991) e Normais Climatológicas da Cidade avaliadas pelo INMET (2009). Observa-se que as médias avaliadas nos Sítios 1, 2 e 3 apresentam comportamento similar às observadas na Estação do Aeroporto, apesar das médias observadas nas primeiras

serem inferiores as observadas na segunda. Este comportamento está associado principalmente ao local onde a estação convencional do aeroporto foi instalada, com ausência de edificações em seu entorno, favorecendo a penetração do fluxo de vento, diferentemente dos locais onde as estações meteorológicas foram instaladas nos sítios urbanos, com presença de edifícios e vegetação, responsáveis pela elevação da rugosidade superficial nos mesmos.

Ao se comparar os dados médios mensais de velocidade do ar nos sítios urbanos com médias históricas de 1961 a 1990, observa-se que os mesmos apresentaram tanto variação sazonal quanto intensidades diferentes da apresentada nas médias históricas (1961-1990). O Sítio 2 apresentou velocidade inferior a normais climatológicas, justificado pelo fato de sua elevada rugosidade. No entanto, os Sítio 1 e 2 apresentaram intensidades médias superiores às observadas na Estação convencional do INMET, com exceção dos meses de dezembro e janeiro no Sítio 1, meses em que a velocidade registrada na estação convencional do INMET foi superior. Este fato chama atenção visto que a estação convencional apresenta rugosidade superficial muito inferior à observada nos sítios urbanos. Outro aspecto importante a ser considerado é a diferente variação sazonal apresentada pelas normais climatológicas. Na estação convencional do INMET, o módulo da velocidade do ar se elevou de agosto a dezembro, mês de máximo (1,13 m/s) e se reduziu de janeiro a julho, mês de mínimo (0,15 m/s). Por outro lado, nas estações urbanas, o módulo da velocidade do ar se elevou de maio a outubro, mês de máximo (1,09 m/s no Sítio 1 e 1,18 m/s no Sítio 3) e se reduziu de outubro a abril, mês de mínimo (0,86 m/s no Sítio 1 e 0,88 m/s no Sítio 3), coincidindo com a variação sazonal da estação da seca (outono-inverno) e da chuva (primavera-verão). A provável explicação para o fato pode ser atribuída à periodicidade das coletas de dados realizadas nas estações convencionais do INMET que são realizadas nos horários de 12, 18 e 24 UTC. Por outro lado, nas estações meteorológicas instaladas nos sítios, a coleta de dados foi realizada de forma mais sistemática, em intervalos de 5 (cinco) em 5 (cinco) minutos. A menor quantidade de observações realizada nas estações convencionais pode introduzir um padrão de comportamento nos dados (um viés) diferente daquele que realmente acontece na região em estudo. Ao se comparar os resultados com os apresentados por Santanna et al. (2008), que também utilizaram

dados coletos automaticamente na estação convencional do INPE, verifica-se que variação sazonal semelhantes, apesar de intensidades diferentes, com valores médios máximos em setembro (4,2 m/s) e mínimos em maio (3,06 m/s), resultados estes que se aproximam dos determinados na estação meteorológica do aeroporto Marechal Rondon, com máximo em outubro (3,25 m/s) e mínimo em junho (2,31 m/s).

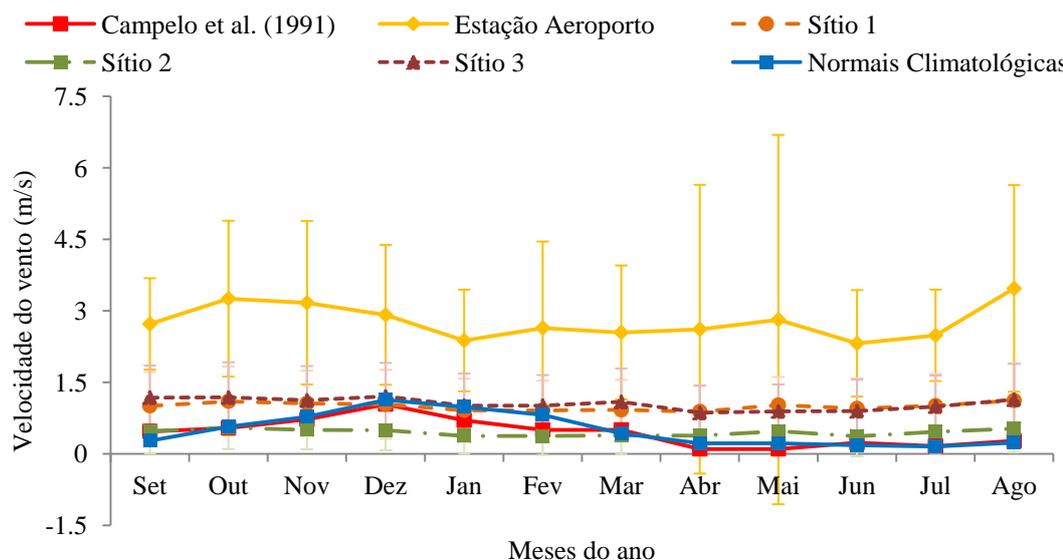


Figura 46 – Velocidade do ar média mensal (\pm DP) para os Sítios 1, 2 e 3, Estação Aeroporto, Campelo et al. (1991) e Normais Climatológicas (1961-1990)

5.2.4.2 Comparação Interurbanas entre os Sítios

O teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) indicou que as distribuições de velocidade do ar para os Sítios 1, 2 e 3 não apresentaram distribuição normal, o que levou a utilização do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis com a finalidade de comparar estatisticamente os resultados encontrados nas observações dos sítios pesquisados. A estatística de Kruskal-Wallis para a variável velocidade do ar demonstrou haver diferença entre os Sítios 1-2, 1-3 e 2-3 ($p < 0,05$), tanto na estação seca quanto na úmida (Tabela B em anexo). Exceção aconteceu entre os Sítios 1-3 na estação seca, onde não houve diferenças significativas.

As diferenças apresentadas na Figura 47 demonstram que as médias mensais da velocidade do ar nos Sítios 1 e 3 foram superiores a do Sítio 2. Já quando se compara as médias do Sítio 1 com as do Sítio 3, constata-se que durante os meses de agosto a março, as médias do Sítio 1 foram inferiores e durante os meses de abril a julho, as médias foram superiores. Analisando estes resultados sob o aspecto da

rugosidade superficial dos sítios, constata-se que os Sítios 1 e 3 foram menos rugosos que o Sítio 2 em todos os meses do ano. Em contrapartida, durante os meses de agosto a março, com predominância de ventos na direção norte (N), o Sítio 1 foi mais rugoso que o Sítio 3. Por outro lado, entre os meses de abril a julho, com predominância de ventos na direção sul (S), o Sítio 1 foi menos rugoso que o Sítio 3. Diante destes comportamentos, é possível inferir que tanto a direção norte quanto a sul do Sítio 2 foram mais rugosas que as dos Sítios 1 e 3; que a direção norte do Sítio 1 é mais rugosa que a do Sítio 3 e que direção sul do Sítio 1 é menos rugosa que a do Sítio 3. O comportamento observado nos sítios ratifica a premissa de que as cidades apresentam superfícies mais rugosas que as observadas no meio rural. Este fato tem importantes implicações na escala e intensidade da turbulência, no perfil e velocidade do vento (diminuição), no tipo de fluxo dentro da camada do dossel urbano, etc. Em termos de diferenças absolutas mensais, as maiores foram observadas no mês de dezembro (0,71 m/s) entre os Sítios 2-3, no mês de agosto (0,59 m/s) entre os Sítios 1-2 e em setembro (0,17 m/s) entre os Sítios 1-3. As menores foram observadas no mês de abril (0,50 m/s) entre os Sítios 1-2, no mês de maio (0,42 m/s) entre os Sítios 2-3 e em julho (0,01 m/s) entre os Sítios 1-3.

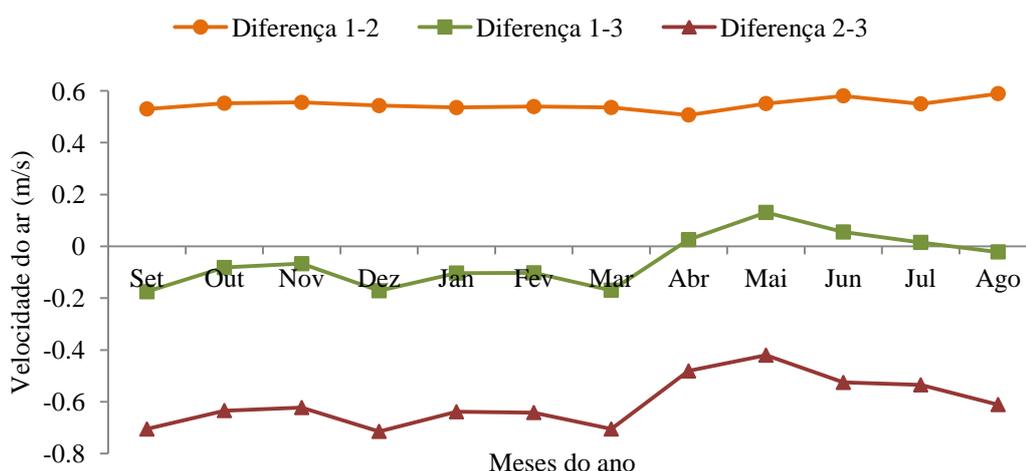


Figura 47 – Diferenças interurbanas entre as médias mensais da velocidade do ar nos sítios urbanos

5.3 CALOR ANTROPOGÊNICO (Q_F)

5.3.1 Variação Sazonal e Diária do Calor liberado pelas Fontes Veiculares (Q_{FV})

É oportuno mencionar que se admitiu que a variação diurna na densidade da população e $pcDVD$ não sofrem variação durante os meses do ano e que estes parâmetros variam somente de um ano para o outro, conforme modelo proposto por Sailor e Lu (2004).

A variação sazonal do calor antropogênico liberado pelas fontes veiculares acompanhou a variação mensal do consumo de combustíveis, com menor dissipação por dia no mês de janeiro, com $0,33 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, $0,37 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $0,35 \text{ MJ m}^{-2}$ e maior dissipação no mês de setembro com $0,40 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, $0,45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $0,42 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ nos Sítios 1, 2 e 3, respectivamente. Pelos dados apresentados, nota-se que as maiores energias emitidas pelas fontes veiculares foram quantificadas no entorno do Sítio 2, seguida dos Sítios 3 e 1, respectivamente.

Em termos de variação diária, é possível verificar que a dissipação de energia no entorno do Sítio 1 apresenta três períodos de máximos, sendo o primeiro deles, no início da manhã, das 7h às 8h, horário de destino ao trabalho/escola; o segundo, próximo do horário do meio dia, das 11 às 12h, retorno do trabalho/escola para almoço, e o último, no final da tarde, das 17 às 18h, horário de retorno do trabalho/escola (Figura 48). Estes horários correspondem aos períodos em que o tráfego é mais intenso no Sítio 1. Os valores máximos de Q_{FV} observados no mês de maior e menor consumo de combustível foram de $7,62 \text{ W m}^{-2}$ (janeiro) e $9,20 \text{ W m}^{-2}$ (setembro) às 7h, horário em que foi observado grande fluxo de veículos na Avenida Miguel Sutil. Por se tratar de uma avenida perimetral, nela convergem e circulam grande parte do fluxo de veículos provenientes de várias regiões da cidade.

O calor antropogênico dissipado pelos veículos no entorno do Sítio 2 apresentou comportamento semelhante ao observado no Sítio 1, com os dois primeiros períodos e horários de máximos coincidindo com os horários observados no Sítio 1, enquanto que no terceiro, observou-se que o horário de pico se encontra adiantado em um hora (das 16 às 17h) (Figura 48). Os valores máximos de Q_{FV} observados no mês de maior e menor consumo de combustível foram superiores aos quantificados no Sítio 1, com de $8,94 \text{ W m}^{-2}$ (janeiro) e $10,79 \text{ W m}^{-2}$ (setembro), ambos às 7h da manhã. A maior intensidade de fluxo liberado pelas fontes veiculares

neste sítio pode ser justificado devido a maior quantidade de veículos que circulam movidos a diesel em seu entorno. A similaridade de comportamento se deve ao fato de ambos os sítios estarem localizados próximos a Av. Miguel Sutil, em regiões diferentes da cidade.

Com relação ao Sítio 3, observa-se que este apresentou comportamento diferenciado dos demais em termos de horários de picos. Tanto no primeiro quanto no segundo horários de picos foram observadas defasagem de uma hora em relação aos horários avaliados nos Sítios 1 e 2. Já o terceiro coincidiu com o horário de pico observado no Sítio 1, mas atrasado em uma hora em relação ao horário de pico do Sítio 2. Os valores máximos de Q_{FV} observados no mês de maior e menor consumo de combustível foram superiores aos quantificados no Sítio 1 e inferiores aos do Sítio 2, com de $8,83 \text{ W m}^{-2}$ (janeiro) e $10,65 \text{ W m}^{-2}$ (setembro) às 17h, horário com intenso fluxo de veículos no sentido de retorno ao bairro pela Av. Historiador Rubens de Mendonça (Av. do CPA). A modificação do horário de máximo observado neste sítio pode ser justificada pelo fato de o mesmo estar localizado em um bairro tipicamente residencial, onde se observa menor fluxo de saída de veículos do bairro durante a manhã do que de chegada durante a noite.

Ferreira (2010) levantou os fluxos de calor antropogênico associados às fontes veiculares na cidade de São Paulo. Os resultados indicaram que a cidade apresenta três horários de máxima dissipação de calor: o primeiro das 7 às 8h, o segundo das 11 às 12h e terceiro das 15 às 16h. Os dois primeiros horários de pico coincidem com os registrados nos Sítios 1 e 2 (comerciais), enquanto o terceiro, encontra-se adiantado em relação ao Sítio 1 em duas horas, e em relação ao Sítio 2, em uma hora, comportamento associado ao período de restrição do tráfego das 17-20h (horário de rodízio) imposto na cidade de São Paulo. Com relação aos horários de pico do Sítio 3, observa-se comportamento diferenciado do observado em São Paulo, justificado pelo fato deste bairro ser residencial. O valor máximo de Q_{FV} observado na cidade de São Paulo foi de aproximadamente 13 W m^{-2} às 8h, valor superior ao observado na cidade de Cuiabá, de $10,79 \text{ W m}^{-2}$ às 7h da manhã no entorno do Sítio 2.

Roth e Quah (2009) avaliaram a dissipação de fluxo de calor antropogênico em bairros comerciais e residenciais na cidade de Singapura. Os valores máximos de

Q_{FV} observados na região comercial e residencial da cidade foram de 15 W m^{-2} e $7,8 \text{ W m}^{-2}$ às 19h, valor este superior e inferior aos registrados neste estudo. Uma provável justificativa para este comportamento pode ser atribuída à elevada densidade populacional das regiões estudadas, dados estes não disponibilizados no artigo pelos autores. Pigeon et al. (2007) verificaram que a dissipação de energia pelas fontes veiculares permaneceu constante durante o ano em Tolouse, França, com valor de 9 W m^{-2} , intensidade muito próxima à determinada neste estudo.

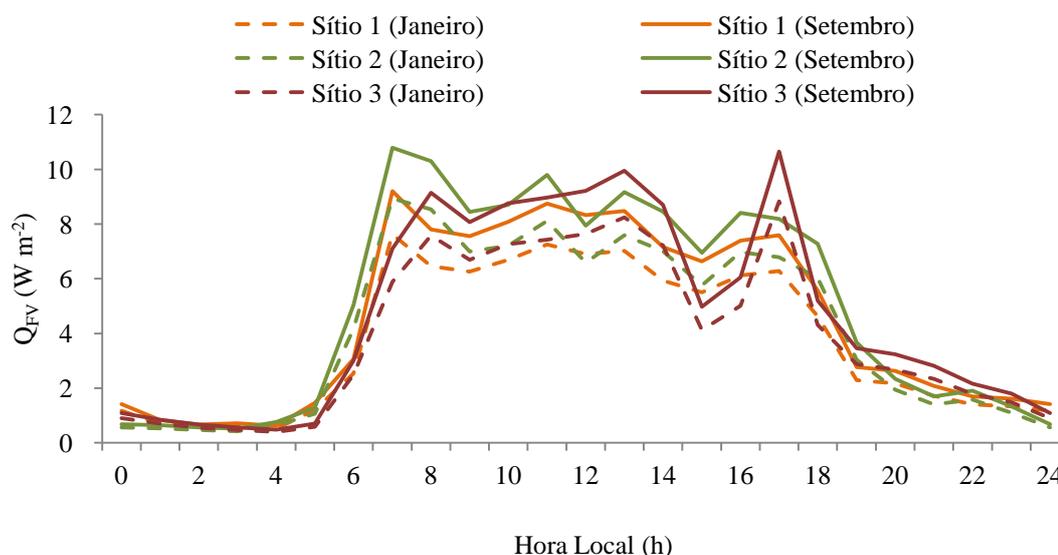


Figura 48 – Variação do calor antropogênico liberado pelas fontes veiculares nos meses de maior e menor consumo de combustíveis

5.3.2 Variação Sazonal e Diária do Calor liberado pelas Fontes Estacionárias

Q_{FS} (Eletricidade - Q_{FSE} e Consumo de Combustíveis - Q_{SFS})

A energia dissipada pelo consumo de combustíveis do tipo gás natural, GLP e óleo combustível resultou em pequena contribuição no ciclo diário de dissipação de calor no meio urbano ($< 0,0025 \text{ W m}^{-2}$ e $< 0,00002 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Em contrapartida, o calor dissipado pelo consumo de eletricidade foi o principal contribuinte no calor dissipado pelas fontes estacionárias. A variação sazonal do calor antropogênico liberado pelo consumo de eletricidade acompanhou a variação mensal do consumo de eletricidade, com menor dissipação por dia no mês de agosto, com $0,085 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e maior dissipação no mês de outubro com $0,11 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, nos Sítios 1, 2 e 3, respectivamente. Como a Rede Cemat somente forneceu as curvas de carga de cada transformador que atende as regiões dos sítios e os consumos mensais da cidade de

Cuiabá como um todo, o consumo mensal em cada região acabou não se alterando entre os sítios pesquisados. Pela análise da variação mensal do consumo de eletricidade e fluxo de calor antropogênico associado às fontes estacionárias, é possível estabelecer relação entre estas variáveis e a média mensal de temperatura registrada nos sítios urbanos. Nas estações de primavera e verão (meses mais quentes) foram registrados os maiores consumo de energia elétrica e maior dissipação Q_{FS} no meio, enquanto nas estações de outono e inverno, observou-se comportamento inverso, ou seja, menor consumo de energia elétrica e menor dissipação de Q_{FS} no meio.

Em termos de variação diária (Figura 49), é possível verificar que no Sítio 1 a dissipação de energia elétrica no meio decresce das 0h até as 6h da manhã, horário de mínima dissipação, a partir do qual esta se eleva até 14h, horário de máximo, decrescendo novamente até as 24h. Este comportamento foi observado tanto nos meses de maior quanto de menor dissipação de energia. Os valores mínimos e máximos de Q_{FSE} observados no mês de menor consumo de eletricidade foram de $0,77 \text{ W m}^{-2}$ e $1,13 \text{ W m}^{-2}$ (agosto) e no mês de máximo, de $1,05 \text{ W m}^{-2}$ e $1,42 \text{ W m}^{-2}$ (outubro). O comportamento representado pelas curvas do Sítio 1 (Figura 49) pode ser atribuído a regiões comerciais em que se verifica elevação de consumo de eletricidade durante o dia em virtude do deslocamento da população para trabalho e /ou estudo e redução durante o período noturno, devido ao retorno às suas residências para descanso.

O Sítio 2 apresentou comportamento diferenciado entre os meses de menor e maior dissipação de energia elétrica. No mês de menor dissipação, é possível verificar que a dissipação da energia no meio decresce da 0h até as 8h da manhã, horário de mínima, a partir do qual esta se eleva até 21 horas, horário de máximo, decrescendo novamente até as 24h (Figura 49). No mês de maior dissipação, observa-se que o consumo energético decresce das 0h até as 6h da manhã, horário de mínima, partir do qual esta se eleva até 14h, horário de máxima, decrescendo novamente até às 24h, comportamento este similar ao observado no Sítio 1. Os valores mínimos e máximos de Q_{FSE} observados no mês de menor dissipação de energia elétrica foram de $0,78 \text{ W m}^{-2}$ e $1,21 \text{ W m}^{-2}$ (agosto) e no mês de máxima, de $1,03 \text{ W m}^{-2}$ e $1,49 \text{ W m}^{-2}$ (outubro), valores superiores aos observados no Sítio 1. O

comportamento representado pelas curvas do Sítio 2 (Figura 49) não se apresentou muito bem definido pois no período de maior consumo, verificou-se elevação de consumo de eletricidade durante o dia e redução durante o período noturno, comportamento típico de regiões comerciais. Por outro lado, no período de menor consumo, observou-se maior elevação no consumo de eletricidade durante o período noturno do que no diurno, típico de regiões residenciais, onde há elevação do consumo elétrico após a chegada das pessoas às suas residências durante noite.

O Sítio 3 apresentou comportamento similar tanto nos meses de menor quanto no de maior consumo de eletricidade. Verificou-se que a dissipação de energia elétrica no meio decresce das 0h até as 7h da manhã, horário de mínima, a partir do qual esta se eleva até 23h, horário de máxima, decrescendo novamente até as 24h. Os valores mínimos e máximos de Q_{FSE} observados no mês de menor dissipação de energia elétrica foram de $0,74 \text{ W m}^{-2}$ e $1,25 \text{ W m}^{-2}$ (agosto) e no mês de máximo, de $1,02 \text{ W m}^{-2}$ e $1,58 \text{ W m}^{-2}$ (outubro). No mês de mínima dissipação de energia, o valor de dissipação horário mínimo foi inferior aos observados nos Sítios 1 e 2, enquanto o de máximo, observou-se comportamento inverso, ou seja, superior aos observados nos Sítios 1 e 2. Comportamento similar foi observado nos meses de maior dissipação de energia elétrica, mínimo horário inferior aos Sítios 1 e 2 e máximo horário superior aos Sítios 1 e 2. O comportamento representado pelas curvas do Sítio 3 (Figura 49) pode ser atribuído a regiões residenciais em que se verifica maior consumo de eletricidade durante o período noturno, retorno da população para descanso, do que no diurno, saída da população para trabalho e/ou estudo.

Ferreira (2010) apresenta a variação dos fluxos de calor antropogênico associado às fontes estacionárias nos meses de fevereiro e agosto de 2004. No primeiro, Q_{FS} variou de $3,82 \text{ W m}^{-2}$ (4h) à $5,09 \text{ W m}^{-2}$ (16h) e no segundo, de $4,13 \text{ W m}^{-2}$ (3h) à $5,80 \text{ W m}^{-2}$ (19h). Os resultados encontrados pelo autor são superiores aos determinados para os sítios urbanos de Cuiabá, onde a máxima dissipação calor quantificada foi de $1,58 \text{ W m}^{-2}$ no entorno do Sítio 3, durante o mês de maior consumo. A diferença de comportamentos pode ser justificada devido ao baixo consumo de combustíveis fósseis verificado na cidade Cuiabá, quando comparado como o consumo da cidade de São Paulo. Enquanto na cidade de Cuiabá foram

consumidos cerca de 19.608.172 kg de GLP, 237.490 kg de óleo combustível e 2.417.000 m³ de gás natural no ano de 2010 (ANP, 2010), em São Paulo o consumo destes combustíveis no ano de 2007 foi de 742.347 kg de GLP, 42.798 kg de óleo combustível e 955.174.285 m³ de gás natural (FERREIRA et al., 2010). O elevado consumo de gás natural justifica a elevada taxa de dissipação de calor produzido pelas fontes estacionárias na cidade de São Paulo.

No estudo realizado em Singapura (ROTH e QUAH, 2009), quantificou-se a máxima taxa de dissipação de calor antropogênico associado às fontes estacionárias, 103 W m⁻² na região comercial às 11h e aproximadamente 5 W m⁻² na região residencial às 23h. A intensidade determinada para região comercial de Singapura é muito superior ao observada na cidade de São Paulo e na região comercial de Cuiabá. A intensidade avaliada na região residencial se aproxima dos valores quantificados em São Paulo, mas foi superior ao observada na região residencial da cidade de Cuiabá. Em Toulouse, França, a dissipação de energia por eletricidade foi a maior fonte nos fluxos de calor antropogênico, com valores de 30 W m⁻² no inverno e 20 W m⁻² no verão, valores estes muito superiores aos observado em São Paulo e Cuiabá. O mesmo aconteceu com a dissipação de energia pelo consumo de gás natural, com expressiva variação entre o inverno (30 W m⁻²) e verão (5 W m⁻²) (PIGEON et al., 2007).

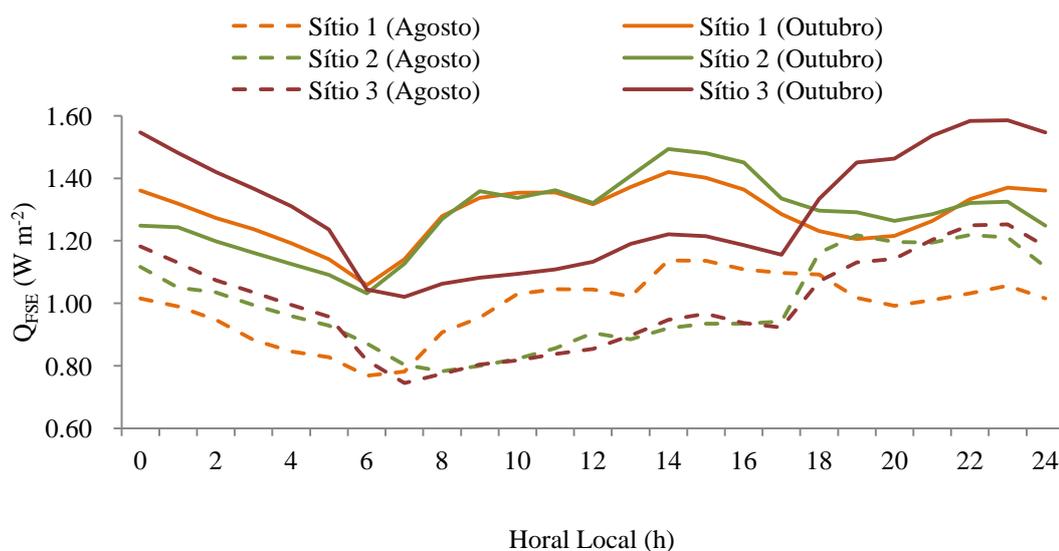


Figura 49 – Variação do calor antropogênico liberado pelas fontes estacionárias de eletricidade nos meses de maior e menor consumo de eletricidade

5.3.3 Variação Sazonal e Diária do Calor liberado pelo Metabolismo Humano

(Q_{FM})

Assumiu-se a hipótese que o calor liberado pelo metabolismo humano seja constante durante todos os dias de um mesmo mês, bem como durante todos os meses do ano. Desta forma, apresenta-se apenas a variação diária do calor metabólico dissipado pela população nos Sítios 1, 2 e 3.

Como o Sítio 1 apresenta características de bairro comercial, observa-se que durante o início da manhã, a partir das 6 horas, a dissipação de calor metabólico no entorno deste sítio se eleva em virtude do deslocamento da população de outras partes da cidade para esta região mais central da cidade, bem como em virtude da elevação da taxa metabólica que ocorre durante o período diurno devido a atividade para trabalho e/ ou estudo. Este comportamento se estende até às 17h, horário que a dissipação se reduz em virtude do fim da jornada de trabalho/ estudo, e retorno da população para os bairros residenciais. A dissipação de calor metabólico é reduzida a partir das 21h, em virtude do período destinado a descanso. A máxima intensidade de Q_{FM} foi de $1,37 \text{ W m}^{-2}$ durante as atividades de trabalho diárias e $0,42 \text{ W m}^{-2}$, a noite durante o período de descanso (Figura 50).

O Sítio 2, com características comerciais, apresenta comportamento similar ao observado no Sítio 1, com maior dissipação de energia durante o período diurno e menor no período noturno (Figura 50). Em virtude da menor densidade populacional do bairro, constata-se que a máxima intensidade de calor metabólico dissipado para o meio foi de $0,39 \text{ W m}^{-2}$ durante o período de diurno e $0,12 \text{ W m}^{-2}$ durante o período noturno, valores estes inferiores aos observados no Sítio 1.

O Sítio 3, com características residenciais, apresentou menor taxa de dissipação de calor metabólico durante o período diurno do que o noturno, em virtude da diminuição da densidade de população do bairro durante o período do dia para trabalho e/ ou estudo. Durante a noite, devido ao retorno da população para o bairro, observa-se que a taxa de dissipação de calor metabólico se eleva das 18h às 21h, alcançando valores superiores aos observados durante o dia. A partir das 21 h, a intensidade de Q_{FM} se reduz em virtude da redução da taxa metabólica, período destinado para descanso. A máxima intensidade de calor metabólico dissipado para o meio foi de $1,55 \text{ W m}^{-2}$ após o retorno da população do trabalho e/ou estudo (das 19h

às 21h) e o menor de $0,40 \text{ W m}^{-2}$, durante o dia, deslocamento da população do bairro para trabalho e/ou estudo (Figura 50).

O calor dissipado pelo metabolismo humano na cidade de São Paulo apresentou comportamento semelhante ao observado nos Sítios 1 e 2, tanto em intensidade como em horários de máximos e mínimos, com máxima dissipação de energia durante o período de 6h às 21h com taxa de $1,50 \text{ W m}^{-2}$, enquanto das 23h às 5h a taxa se reduziu para $0,92 \text{ W m}^{-2}$. Durante os horários de transição, as taxas de dissipação apresentaram comportamento intermediário. As diferenças de magnitude entre os fluxos antropogênicos se devem principalmente devido a densidade populacional adotada na cidade de São Paulo e nos bairros de Cuiabá. O Sítio 3, com características residenciais, apresentou comportamento diferenciado do observado na cidade de São Paulo em virtude do deslocamento da população para trabalho e/ou estudo durante o período diurno, o que contribuiu para a redução do calor dissipado naquela região. Em Roth e Quah (2009) não foi disponibilizado os dados de densidade populacional utilizados na avaliação calor dissipado pelo metabolismo humano nos bairros comercial e residencial, o que não tornou possível a quantificação da intensidade da energia dissipada no meio para estas regiões. No entanto, as taxas metabólicas utilizadas para estimativa de Q_{FM} foram superiores as utilizadas neste trabalho, 305 W durante as atividades de trabalho e/ou estudo e 168 W durante o período de repouso. Devido à elevada densidade populacional, é provável que a contribuição de Q_{FM} seja superior a observada nos sítios de Cuiabá.

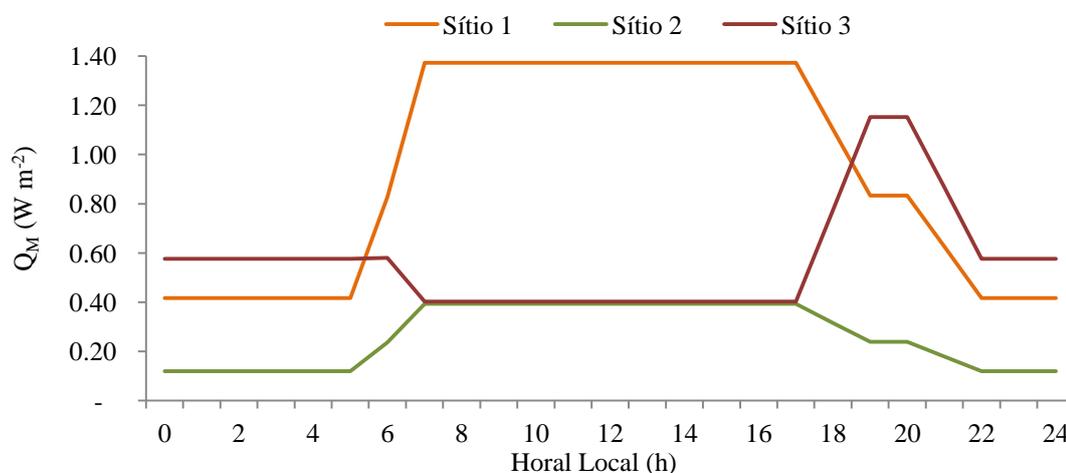


Figura 50 – Variação diária do calor antropogênico liberado pelo metabolismo humano nos Sítios 1, 2 e 3

5.3.4 Variação Sazonal e Diária do Calor Antropogênico (Q_F)

A Figura 51 apresenta a variação sazonal dos valores mensais dos fluxos de calor antropogênicos provenientes das fontes estacionárias, veiculares e metabólicas nos Sítios 1, 2 e 3 da cidade de Cuiabá-MT. Como pode ser observado, o combustível consumido pelos veículos é a principal fonte de dissipação de energia no meio, correspondendo com aproximadamente 66,60, 77,30 e 72,70% de Q_F nos Sítios 1, 2 e 3, respectivamente. Em São Paulo, Q_{FV} foi responsável por aproximadamente 53% de Q_F . De acordo com Sailor e Lu (2004), a contribuição das fontes veiculares no fluxo de calor antropogênico varia entre 47 e 62%. O fato de Q_{FS} ser superior aos valores encontrados na literatura se deve ao fato de nos países (sub) tropicais a contribuição das fontes estacionárias ser inferior às regiões de clima temperado, onde enorme quantidade de energia é utilizada no inverno para aquecimento dos edifícios. Observa-se que os valores de Q_{FV} se alteram ao longo do ano, acompanhando o consumo mensal de combustíveis, com menor dissipação no mês de janeiro e maior no mês de setembro.

As fontes estacionárias (Q_{FS}) são responsáveis pela segunda maior fonte de dissipação de energia no meio, com aproximadamente 18,20, 18,40 e 18,30% de Q_F nos Sítios 1, 2 e 3, respectivamente. Em São Paulo, esta fonte contribuiu com aproximadamente 38% dos valores de fluxos diários de calor antropogênico, principalmente pelo enorme consumo de gás natural, quase 400 vezes superior ao observado em Cuiabá. Diferentemente do verificado por Ferreira (2010), observa-se que o consumo energético na cidade de Cuiabá se altera com as estações do ano, provocando alteração na dissipação Q_{FS} ao longo das estações. Verificou-se o menor consumo energético no mês de agosto (inverno), conseqüentemente, menor dissipação de calor antropogênico pelas fontes estacionárias. Em outubro (primavera), verificou-se o maior consumo e a maior dissipação de energia. Isso indica que durante os meses frios do ano (junho, julho e agosto), as fontes estacionárias de energia são pouco afetadas pela utilização de eletricidade ou consumo de combustível para aquecimento dos edifícios durante o inverno. É fato que a maioria de residências e edifícios em Cuiabá não utiliza energia elétrica para aquecimento durante o inverno, em virtude da menor rigor climático observado na região durante estes meses. No entanto, em cidades de com clima temperado, Sailor e

Lu (2004) destacam que a energia utilizada para aquecimento dos edifícios nas cidades de latitudes médias e altas pode atingir durante o inverno valor superior a 40% do fluxo de calor antropogênico. Conforme destacam os autores, em algumas cidades dos EUA as fontes estacionárias chegaram a contribuir com até 57% do valor diário de Q_F . Em Toulouse, França, foi observado que a dissipação de energia no meio proveniente das fontes estacionárias, principalmente pelo consumo de gás natural, elevam-se consideravelmente no período de inverno (PIGEON et al., 2007).

O aumento de consumo de energia e maior dissipação de Q_{FS} observado em outubro, mês com maior média mensal de temperatura (INMET, 2009) é justificado pelo uso de equipamentos para a refrigeração com o intuito de amenizar as elevadas temperaturas do ar observadas na região, diferentemente do que se observa em São Paulo, onde o uso destes aparelhos não é muito comum durante as estações de primavera e verão. Nas cidades de clima temperado ocorre fenômeno inverso, ou seja, é comum se verificar a redução de Q_F no período de verão em virtude da menor utilização de energia para aquecimento dos edifícios e residências (SAILOR e LU, 2004, PIGEON et al., 2007, OFFERLE et al., 2005).

A energia liberada pelas fontes metabólicas é responsável pelas menores contribuições na cidade de Cuiabá, apenas 15,1, 4,3 e 9,0% nos Sítios 1, 2 e 3, respectivamente. Em países de clima temperado, a energia liberada pelas atividades metabólicas normalmente não excede 3% do fluxo total de calor antropogênico, conforme destacam Sailor e Lu (2006). Em São Paulo, as atividades metabólicas contribuíram com cerca de 9% de Q_F , taxa semelhante à observada no Sítio 3 com características residenciais. Ferreira (2010) destaca que a contribuição proveniente das fontes metabólicas é resultado ao grande número de habitantes e ao baixo consumo de energia per capita de São Paulo. Destaca-se que como as fontes estacionárias contribuem com menor quantidade de dissipação de energia antropogênicas, naturalmente a porcentagem representativa do calor metabólico se eleva quando comparadas com as porcentagens avaliadas nos países de clima temperado. Outro aspecto importante que contribui para alterar de forma significativa a porcentagem de participação do calor metabólico é densidade populacional do entorno de cada sítio, parâmetro que representa melhor a dissipação de energia quando comparada com a densidade populacional da cidade como um todo. Este fato

justifica as diferentes participações do calor metabólicos no calor antropogênico nos entorno dos sítios pesquisados.

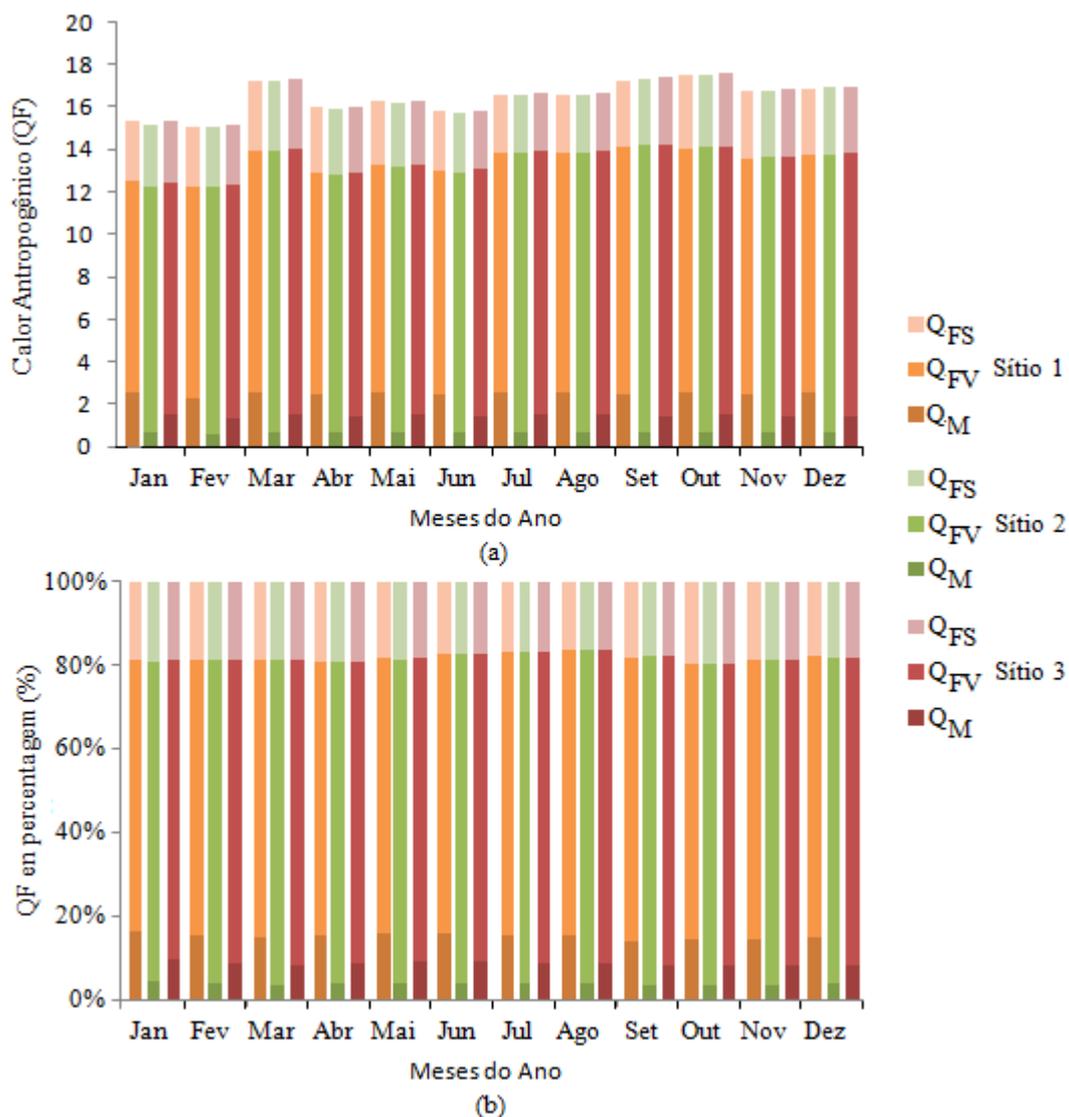


Figura 51 – Variação sazonal dos Fluxos de calor antropogênicos (Q_F) em termos de intensidade em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ (a) e porcentagens (b) nos Sítios 1, 2 e 3

Pela análise da variação sazonal do fluxo de calor antropogênico (Figura 51) verificou-se que a maior dissipação de energia média diária ocorreu no mês de setembro com $0,57 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ em média no entorno dos Sítios 1, 2 e 3. A maior dissipação média mensal ocorreu no mês de outubro com $17,49 \text{ MJ m}^{-2} \text{mês}^{-1}$, $17,51 \text{ MJ m}^{-2} \text{mês}^{-1}$ e $17,53 \text{ MJ m}^{-2} \text{mês}^{-1}$, no entorno dos Sítios 1, 2 e 3, respectivamente. A menor dissipação de energia média diária foi observada no mês de janeiro com $0,49 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, $0,48 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e $0,49 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ no entorno dos Sítios 1, 2 e 3, bem como a menor média mensal, com $15,38 \text{ MJ m}^{-2} \text{mês}^{-1}$,

15,15 MJ m⁻²mês⁻¹ e 15,27 MJ m⁻²mês⁻¹, respectivamente. Ao se comparar os valores máximos e mínimos mensais observados, constata-se que a variação sazonal máxima verificada foi de 15,60%, superior a observada em São Paulo, de 10%. Em São Paulo, o maior fluxo de Q_F foi avaliado em agosto com 30,56 MJ m⁻²mês⁻¹ e o menor em fevereiro, com 27,30 MJ m⁻²mês⁻¹. No mês de maior e menor dissipação, o calor antropogênico na cidade chegou a ser 75% e 79% superior aos observados na cidade de Cuiabá.

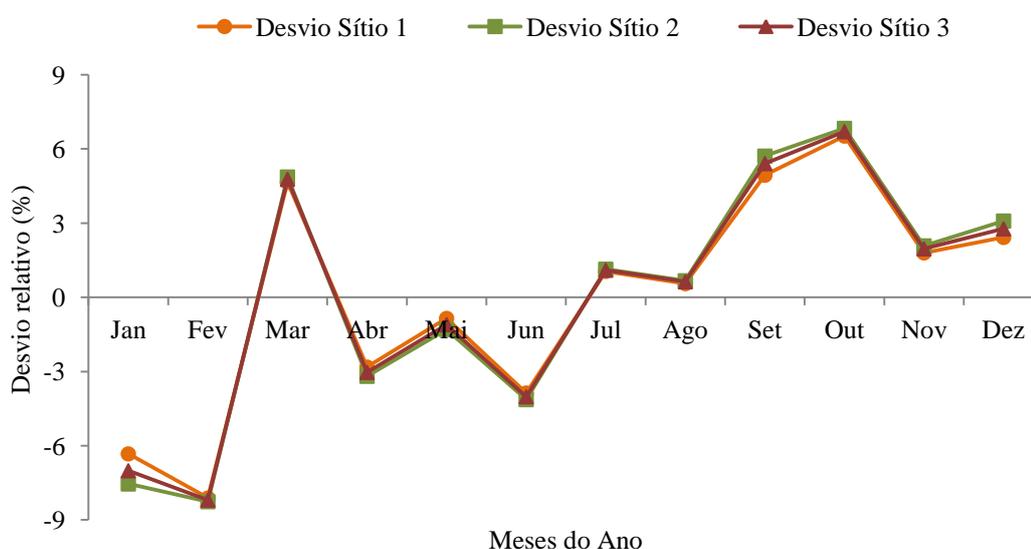


Figura 52 – Desvio relativo da média anual dos valores de Q_F mensais-Sítios 1,2 e 3

A Figura 52 mostra o desvio relativo da média anual do fluxo de calor antropogênico (Q_F). Pela análise da figura é possível perceber que as variações observadas em Q_F podem estar associadas à economia da cidade de Cuiabá. Os valores negativos observados nos meses de janeiro, fevereiro e junho podem estar relacionados ao período de férias, com menor atividade econômica. No primeiro semestre, observa-se que o desvio ora são positivos ora negativos, fato este que pode estar relacionado à oscilação da economia local. No segundo semestre, observa-se que o desvio se eleva positivamente até outubro e decresce, mas mantendo-se positivo, em novembro e dezembro, fato este que pode estar associado à maior atividade econômica neste período. No entanto, não se pode atribuir à variação dos fluxos antropogênicos apenas a atividade econômica na cidade. As menores dissipações de energia observadas nos meses de abril a junho e as maiores observadas nos meses de setembro a dezembro estão relacionadas também as

estações de outono-inverno e primavera-verão, nas quais são observadas as menores e maiores temperatura do ar na região. Oliveira (2007), ao analisar o consumo de energia elétrica em residências na cidade de Cuiabá-MT, verificou que a maior utilização de energia elétrica se dá principalmente pelos aparelhos responsáveis pela aclimatização dos ambientes (ar condicionado e ventiladores), que ocorrem nos períodos mais quentes do ano, na primavera e verão.

A dissipação anual de energia pelas fontes antropogênicas alcançaram $197,19 \text{ MJ m}^{-2}\text{ano}^{-1}$, $197,16 \text{ MJ m}^{-2}\text{ano}^{-1}$ e $196,72 \text{ MJ m}^{-2}\text{ano}^{-1}$ no entorno dos Sítios 3, 1 e 2, respectivamente. O Sítio 3 (mais periférico) apresentou maior dissipação de calor antropogênico do que o Sítio 1 (mais central) em virtude da maior dissipação de energia pelas fontes veiculares devido ao intenso fluxo de veículos observado principalmente durante o período noturno, bem como pela maior dissipação de calor metabólico neste mesmo período (Figura 53).

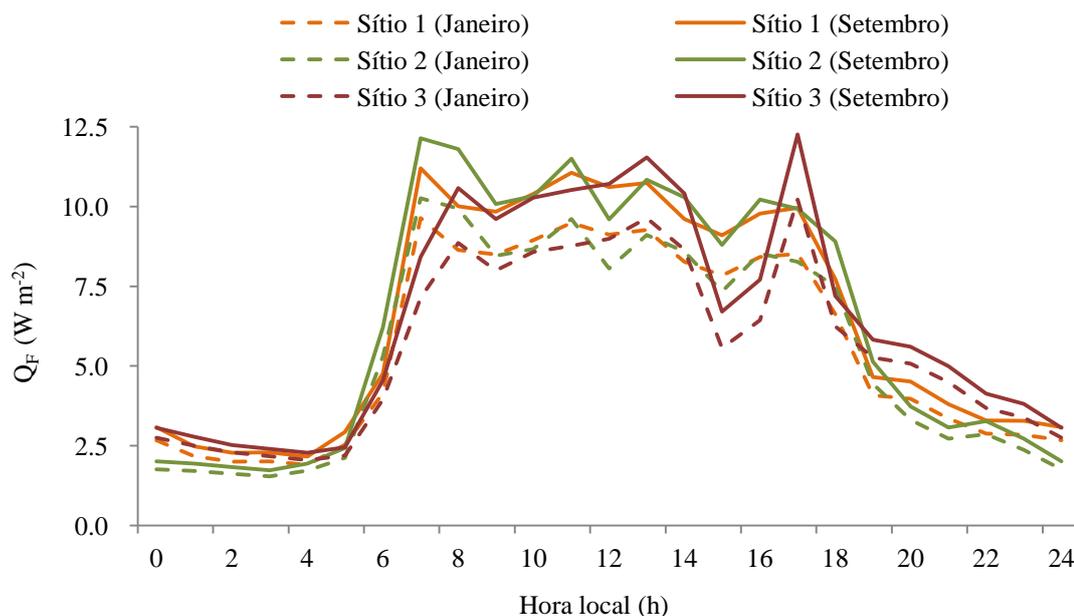


Figura 53 – Variação diária do fluxo de calor antropogênico (Q_F) liberado no entorno dos Sítios 1, 2 e 3

As menores e maiores dissipação de Q_F foram verificadas nos meses de janeiro e setembro, e acompanham o comportamento de Q_{FV} , sendo este termo o que representa maior contribuição de energia dentro do dossel urbano. Ao analisar as curvas de variação diária de Q_F , é possível verificar que a dissipação de energia no entorno do Sítio 1, assim como Q_{FV} , apresenta três períodos de máximos: o primeiro

acontece no início da manhã, das 7h às 8h, horário de destino ao trabalho/escola, com dissipação de 9,64 e 11,20 W m^{-2} nos meses de janeiro e setembro, respectivamente; o segundo é verificado próximo ao meio dia, das 11h às 12h, retorno do trabalho/escola para almoço, com dissipação de 9,49 e 11,06 W m^{-2} ; e o terceiro, no final da tarde, das 17h às 18h, horário de retorno do trabalho/escola, com dissipação de 8,53 e 9,96 W m^{-2} (Figura 53).

Nota-se pela análise da Figura 53 que Q_F dissipado no entorno do Sítio 2 apresentou comportamento semelhante ao observado no Sítio 1, com os dois primeiros períodos e horários de máximos coincidindo com os horários observados no Sítio 1. Quanto ao terceiro, foi observado que o horário de pico também se dá no período vespertino. No entanto, adiantado em uma hora (16 às 17h). Em termos de dissipação de energia o primeiro pico apresentou 10,26 e 12,14 W m^{-2} nos meses de janeiro e setembro, respectivamente; o segundo, 9,61 e 11,50 W m^{-2} e o terceiro, 8,53 e 10,22 W m^{-2} . Os valores de picos deste sítio foram todos superiores aos observados no Sítio 1.

Observa-se no Sítio 3 que Q_F apresentou comportamento diferenciado dos demais em termos de horários de picos. O primeiro horário de pico matutino foi observado das 8h às 9h, com dissipação de 8,86 e 10,58 W m^{-2} nos meses de janeiro e setembro, respectivamente; o segundo, foi registrado no início do horário vespertino das 13h às 14h, com intensidade de 9,64 e 11,54 W m^{-2} , enquanto o terceiro horário de pico, das 17h às 18h, com 10,22 e 12,26 W m^{-2} . Enquanto que para os Sítios 1 e 2 os horários de maior dissipação de Q_F foram no início da manhã, no Sítio 3, verificou-se comportamento inverso, com maior dissipação no final do período vespertino. Os valores registrados no segundo e terceiro horários de pico no Sítio 3 foram superiores aos observados nos Sítios 1 e 2. Por outro lado, o primeiro horário de pico foi inferior. Isso deve ao fato de os Sítios 1 e 2 estarem inseridos em áreas comerciais onde a maior intensidade de fluxo de veículos (maior contribuinte das fontes antropogênicas) foi observado no período matutino, no início da manhã. O sítio 3, inserido em área tipicamente residencial, a maior intensidade de fluxo de veículos foi observado no final do período vespertino, conseqüentemente, a maior dissipação se dá neste horário.

Assim como na cidade de Cuiabá, a cidade de São Paulo apresentou três máximos relativos, sendo os maiores ocorrendo no início da manhã ($\sim 19,1 \text{ W m}^{-2}$) outro próximo ao meio dia com ($\sim 18,6 \text{ W m}^{-2}$) e último no final da tarde ($\sim 19,3 \text{ W m}^{-2}$). Segundo Ferreira (2010), este comportamento, assim como os observados nos sítios urbanos de Cuiabá, reflete o padrão de tráfego de veículos da cidade de São Paulo. No período de verão (junho, julho e agosto), a dissipação de calor antropogênico em regiões centrais da cidade de Toulouse, França, variou de 5 a 25 W m^{-2} (PIGEON et al., 2007), intensidade próxima às verificadas na cidade de São Paulo, mas bem superior as observadas na cidade de Cuiabá. Em Łódź (Polônia) durante o verão, a intensidade média de calor antropogênico de áreas densamente povoadas foi de 14 W m^{-2} (KŁYSIK, 1995), valor intermediário ao observado na cidade de Cuiabá e São Paulo. Nas áreas suburbanas de Toulouse e Łódź, o fluxo de calor antropogênico foi menor que 5 W m^{-2} e 2 W m^{-2} , respectivamente. Em Singapura, a intensidade máxima de Q_F foi de aproximadamente 116 W m^{-2} em bairro comercial (região central da cidade) e de 15 W m^{-2} em bairros residenciais (ROTH e QUAH, 2009). A primeira intensidade é muito superior as observadas nas cidades de clima temperado, enquanto a intensidade da segunda se aproxima dos valores encontrados nas cidades de Cuiabá e São Paulo, com climas sub (tropicais). Sailor e Hart (2006) avaliariam a intensidade de fluxo de calor antropogênico na cidade de Miami, sul da Flórida, cidade esta com características climáticas e populacionais semelhantes a cidade de Cuiabá. O valor máximo de Q_F encontrado para o verão foi de $28,5 \text{ W m}^{-2}$, intensidade muito superior a máxima observada na cidade de Cuiabá, em setembro de $12,26 \text{ W m}^{-2}$.

5.3.5 Comparação Interurbanas entre os Sítios

O teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) indicou que as distribuições de Q_F nos sítio estudados não apresentaram distribuição normal, o que levou a utilização do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis com a finalidade de comparar estatisticamente os valores de Q_F estimados. A estatística de Kruskal-Wallis indicou não haver diferença significativa entre os valores dos fluxos de calor antropogênicos estimados para as áreas de estudo ($p < 0,05$), tanto na estação seca quanto na úmida (Tabela B em anexo). Apesar de estatisticamente Q_F serem iguais, nota-se pela análise da Figura 54 que foram observadas diferenças nos valores de Q_F entre as

áreas de estudo que podem ser atribuídas aos fluxos de veículos bem como ao consumo mensal de eletricidade avaliado no entorno de cada sítio urbano.

As diferenças apresentadas na Figura 54 demonstram que as médias mensais do fluxo de calor antropogênico no Sítio 1 foram superiores as determinadas para o Sítio 2 de janeiro a agosto. De setembro a dezembro, observa-se comportamento inverso. A máxima diferença observada no primeiro período foi de $0,23 \text{ W m}^{-2}$ em janeiro, e no segundo de $-0,10 \text{ W m}^{-2}$ em setembro, meses de menor e maior dissipação de energia no meio naqueles ambientes. Comportamento semelhante se observa entre os Sítios 1 e 3, onde as médias mensais de Q_F no Sítio 1 foram superiores as observadas no Sítio 3 de janeiro a junho e inferior de julho a dezembro. A máxima diferença observada no primeiro período foi de $0,11 \text{ W m}^{-2}$, em janeiro, enquanto que no segundo de $-0,08 \text{ W m}^{-2}$ em setembro. As diferenças indicam que no Sítio 2 a dissipação de energia ao longo do ano sempre foi inferior a observada no Sítio 3. A maior diferença observada foi de $-0,12 \text{ W m}^{-2}$ em janeiro. Como se pode constatar as diferenças são muito tênues e estão relacionadas principalmente ao volume de tráfego de veículo e consumo elétrico que ocorre ao longo do ano nas regiões pesquisadas.

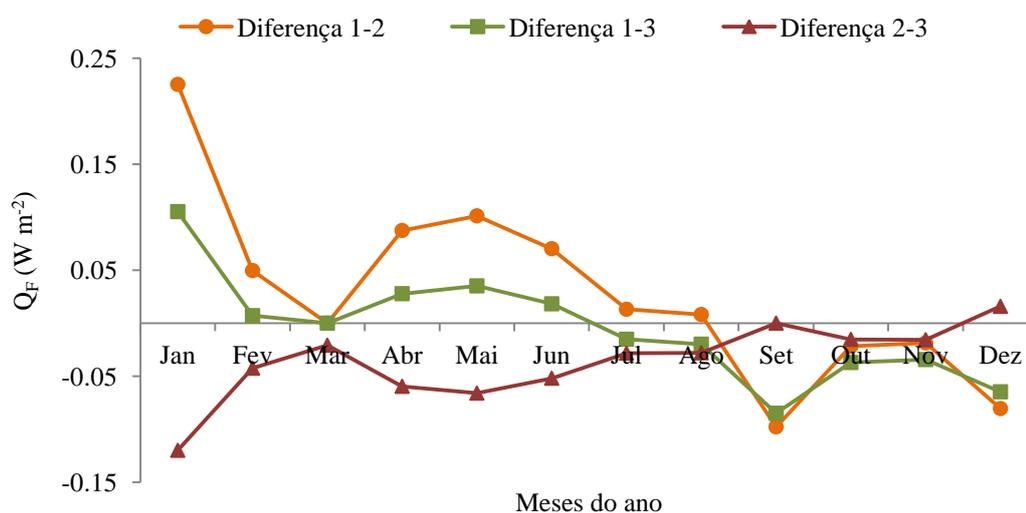


Figura 54 - Diferenças interurbanas entre as médias mensais do calor antropogênico nos sítios urbanos

5.4 CALOR ARMAZENADO NO DOSSSEL URBANO (ΔQ_s)

5.4.1 Coeficientes do Modelo de Histerese (OHM) determinados para região

Nas Tabelas E, F e G em anexo são apresentados os coeficientes que foram utilizados no Modelo Objetivo de Histerese (OHM) proposto por Grimmond et al. (1991) para estimar o fluxo de calor armazenado no dossel urbano nos Sítios 1, 2 e 3. Para a obtenção dos coeficientes a_1 , a_2 e a_3 para a vegetação (dados de Sinop-MT), solo exposto (dados Fazenda Miranda localizada no município de Santo Antonio do Leverger-MT) e concreto (dados dos fluxímetros instalados no concreto), utilizou-se o modelo de regressão proposto por Camuffo e Bernardi (1982), sendo o ajuste avaliado a partir da estatística da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), de forma que os coeficientes determinados foram aqueles que minimizaram a estatística adotada.

Devido à indisponibilidade de dados, os coeficientes para asfalto, telhado e cânions urbanos foram mantidos constantes ao longo dos meses. Os melhores ajustamentos foram conseguidos com os dados dos fluxímetros da floresta de Sinop-MT, seguido dos dados dos fluxímetros da Fazenda Miranda e por último com os dados dos fluxímetros instalados sob concreto nos pátios centrais das escolas (Tabelas E, F e G em anexo).

Os coeficientes determinados para vegetação e solo se aproximam dos determinados na literatura (GRIMMOND et al., 1991, GRIMMOND E OKE, 1998, GRIMMOND E OKE, 2002). Um fato que chama a atenção é a troca de sinal verificada no coeficiente a_2 . Enquanto nas cidades de clima temperado verifica-se que a_2 é positivo, em todos os ajustes realizados neste trabalho obteve-se coeficiente negativo, o que indica que o pico no fluxo de calor no solo ou no dossel acontece posteriormente ao pico no saldo de radiação.

Outro aspecto importante é que sinal negativo deste coeficiente leva a trajetória descrita pela curva de histerese a ser anti-horária. Este comportamento foi verificado por Anandakumar (1999) nos meses quentes em estudo realizado em avenidas pavimentadas com asfalto em Viena, Áustria. Foi verificado que nos meses frios, os coeficientes a_2 foram positivos e a curva de histerese descreveu trajetória elíptica no sentido horário, enquanto que nos meses quentes, a_2 foram negativos e a curva de histerese apresentou sentido anti-horário. Diante deste comportamento,

optou-se por utilizar neste trabalho a média dos coeficientes negativos encontrados pelo referido autor para a representação do comportamento de histerese para o asfalto.

Quanto aos coeficientes a_1 e a_2 determinados para o concreto, observa-se que estes diferiram de forma substancial dos apresentados na literatura. Enquanto Grimmond e Oke (2002) sugerem valores de a_1 que variam de 0,81 a 0,85, neste trabalho eles variaram de 0,09 a 0,32, valores muito abaixo dos sugeridos. De forma similar aos coeficientes determinados para vegetação e solo, os coeficientes a_2 ajustados foram negativos, o que de certa forma ratifica os resultados encontrados para o concreto.

Na Figura 55a apresenta-se uma simulação do comportamento da histerese para os diferentes tipos de classes definidas para representar o calor armazenado no dossel urbano. Os coeficientes médios ponderados utilizados para representar o comportamento da energia armazenada no entorno dos Sítios 1, 2 e 3 são apresentados na Figura 55b. Os coeficientes utilizados na plotagem dos gráficos foram os médios anuais obtidos para a vegetação, solo e concreto (média dos três sítios), e os coeficientes sugeridos na literatura para asfalto, telhados e cânions. É possível perceber entre as classes definidas que a quantidade de energia armazenada nos materiais utilizados no meio urbano decresce na seguinte ordem: asfalto, cânion urbano (paredes), solo, concreto, telhado e vegetação. Os coeficientes médios obtidos para representar o comportamento no entorno dos Sítios 1, 2 e 3 foram obtidos a partir da composição dos coeficientes individuais ponderados pela área das classes definidas no entorno destes sítios. Nota-se que os coeficientes descrevem uma trajetória elíptica anti-horária (ver setas na Figura 55b) intermediária entre o comportamento descrito pelas classes de solo e cânion urbano (parede).

As inclinações das curvas de histerese mostradas na Figura 55 são determinadas pelo coeficiente a_1 , que representam a taxa com que a energia do meio é armazenada dentro de cada classe de uso e ocupação do solo definida no entorno dos sítios. Pela análise das Tabelas E, F e G em anexo e da Figura 55, percebe-se que os maiores coeficientes foram obtidos no asfalto, cânion (paredes), solo, concreto, telhado e vegetação, respectivamente. O coeficiente a_1 ponderado para o entorno dos Sítios 1, 2 e 3 ficou compreendido entre os do solo e cânions urbanos. O coeficiente

a_2 representa a amplitude da histerese observada em cada tipo de classe definida no entorno dos sítios. É possível observar que os maiores efeitos de histerese acontecem no asfalto e no concreto. A amplitude da curva de histerese do telhado, solo, cânion urbano e vegetação é praticamente inexistente, estando desta forma estes materiais em fase com a radiação líquida no meio. Nota-se que as curvas de histerese para a vegetação, solo, concreto e asfalto se desenvolvem no sentido anti-horário e as das curvas para cânions urbanos e telhado no sentido horário, em virtude destas terem sido avaliadas em cidades de altas latitudes (GRIMMOND E OKE, 2002). O termo a_3 está relacionado com a interceptação da curva de histerese no eixo de ΔQ_S quando a radiação líquida no meio (Q^*) se iguala a zero. Os maiores valores foram observados no cânion urbano, seguido do solo, asfalto, concreto, telhado e vegetação.

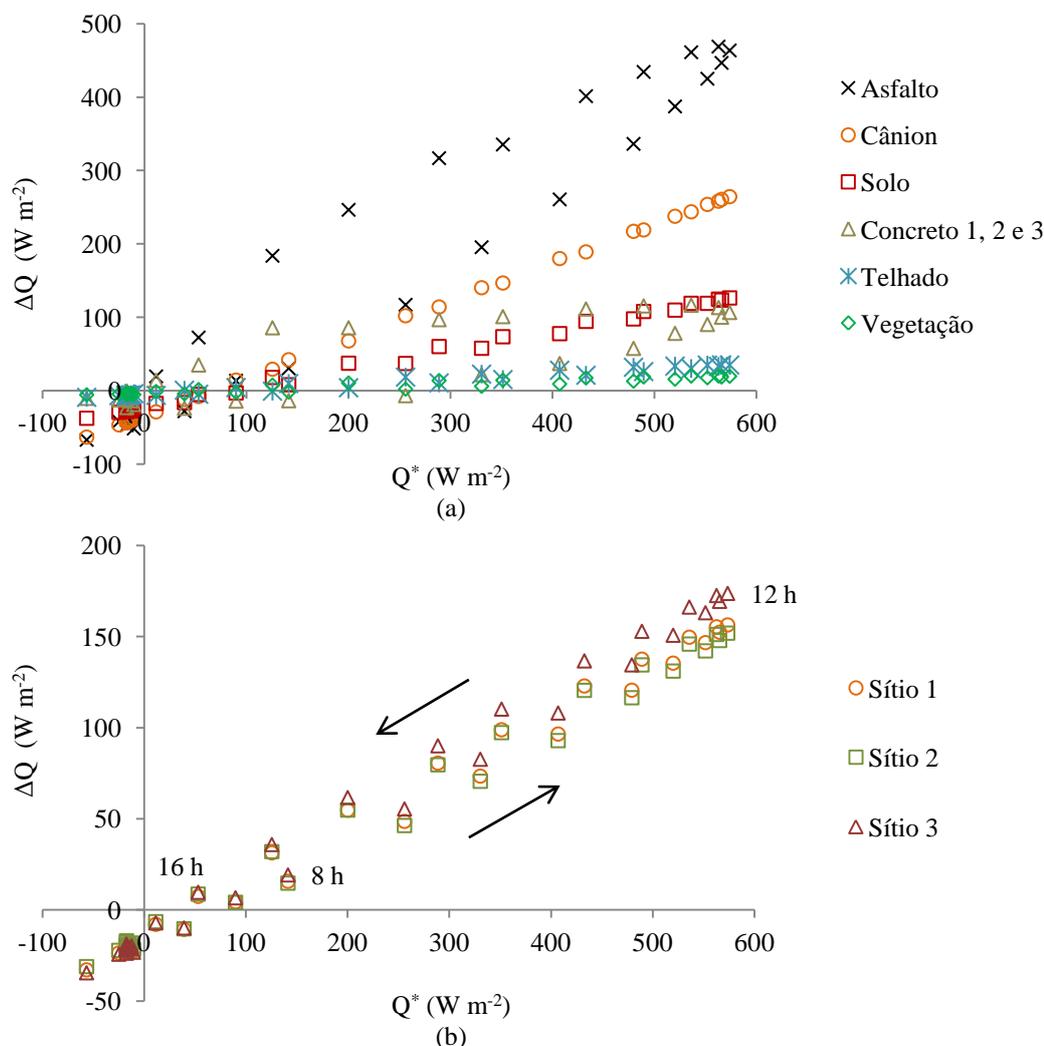


Figura 55 – Simulação das curvas de histerese com os coeficientes médios anuais determinados para (a) asfalto, cânion, solo, concreto, telhado e vegetação e (b) Sítios 1, 2 e 3

É possível estabelecer relações entre a energia média armazenada no dossel urbano e a radiação líquida no meio nos Sítios 1, 2 e 3: primeiro, a transferência da energia do meio para o dossel urbano se deu a uma taxa de aproximadamente 30%, 29% e 33%, respectivamente; segundo, o efeito de histerese observado entre a energia armazenada no dossel urbano e a radiação líquida no meio foi muito pequeno, apenas -0,13, -0,14 e -0,14 horas, o que permite concluir que ΔQ_S e Q^* estão praticamente em fase; terceiro, que os pontos de interceptação das curvas elípticas de histerese no eixo de ΔQ_S para os Sítios 1, 2 e 3 ocorreram com intensidade de -15,98, -14,76 e -15,89 $W m^{-2}$, respectivamente. Diante disso, nota-se que os coeficientes avaliados não sofreram grandes variações entre os sítios estudados. A provável justificativa para este fato se deve aos valores constantes dos coeficientes utilizados para asfalto, telhado e cânion urbano, visto que estas classes representaram a maior parte de área do entorno dos sítios. É importante destacar que estes coeficientes em sua grande maioria foram determinados em regiões de clima temperado, podendo sua utilização superestimar a energia armazenada no dossel urbano de cidades (sub) tropicais (CALLEJAS et al., 2011c).

Com intuito de comparar os resultados, apresenta-se o estudo realizado na cidade de Miami, sul da Flórida, onde se obtiveram coeficientes iguais a 0,41, 0,428h e -36,6 $W m^{-2}$ para a_1 , a_2 e a_3 , respectivamente (GRIMMOND e OKE, 1998). Apesar das semelhanças entre os climas das cidades (tipo Aw), observa-se que a taxa de transferência de energia para o dossel em Miami é 37% superior à observada em Cuiabá e que há histerese positiva de aproximadamente de meia hora em relação a Q^* (avanço de fase). Isso indica que o pico de energia armazenado dentro do dossel urbano antecede o pico de radiação líquida. Por outro lado, em Cuiabá, ΔQ_S e Q^* possuem histerese negativa e se encontram praticamente em fase. Em Ouagadougou, Burkina Faso (Clima tipo BSh) a energia armazenada dentro do dossel urbano foi estimada mas o modelo de histerese não foi aplicado aos dados, o que impede que comparações sejam realizadas nesta pesquisa. Em estudo realizado no Brasil, Ferreira (2010), utilizando os coeficientes determinados para cidades de clima temperado, encontrou resultados muito semelhantes aos observados em Miami e para a cidade de São Paulo: $a_1=0,58$, $a_2=0,48h$ e $a_3=-35,70$. Estes valores divergem consideravelmente dos determinados para a cidade de Cuiabá.

5.4.2 Variação Sazonal e Diária do Calor Armazenado no Dossel Urbano nos Sítios 1, 2 e 3

Ao se analisar a variação sazonal dos fluxos mensais de calor armazenado no dossel urbano no Sítio 1 (Figura 56a), é possível perceber que o valor mínimo mensal foi registrado no mês de fevereiro com $37,78 \text{ MJ m}^{-2}\text{mês}^{-1}$ (valor médio diário de aproximadamente $1,35 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) e o valor máximo em abril com intensidade de $69,59 \text{ MJ m}^{-2}\text{mês}^{-1}$ ($2,32 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$). A menor fração entre a energia armazenada dentro do dossel e a energia disponível no meio aconteceu em fevereiro com 13,13% e a maior em maio, com 19,53% (Figura 56b). A média anual de ΔQ_S correspondeu a aproximadamente a 16,05% da energia disponível no meio ($Q^* + Q_F$), enquanto no período seco e úmido, as relações observadas foram de 18,31 e 15,47%, respectivamente. Os resultados encontrados indicam que este sítio urbano apresentou taxas intermediárias de armazenamento entre os sítios estudados.

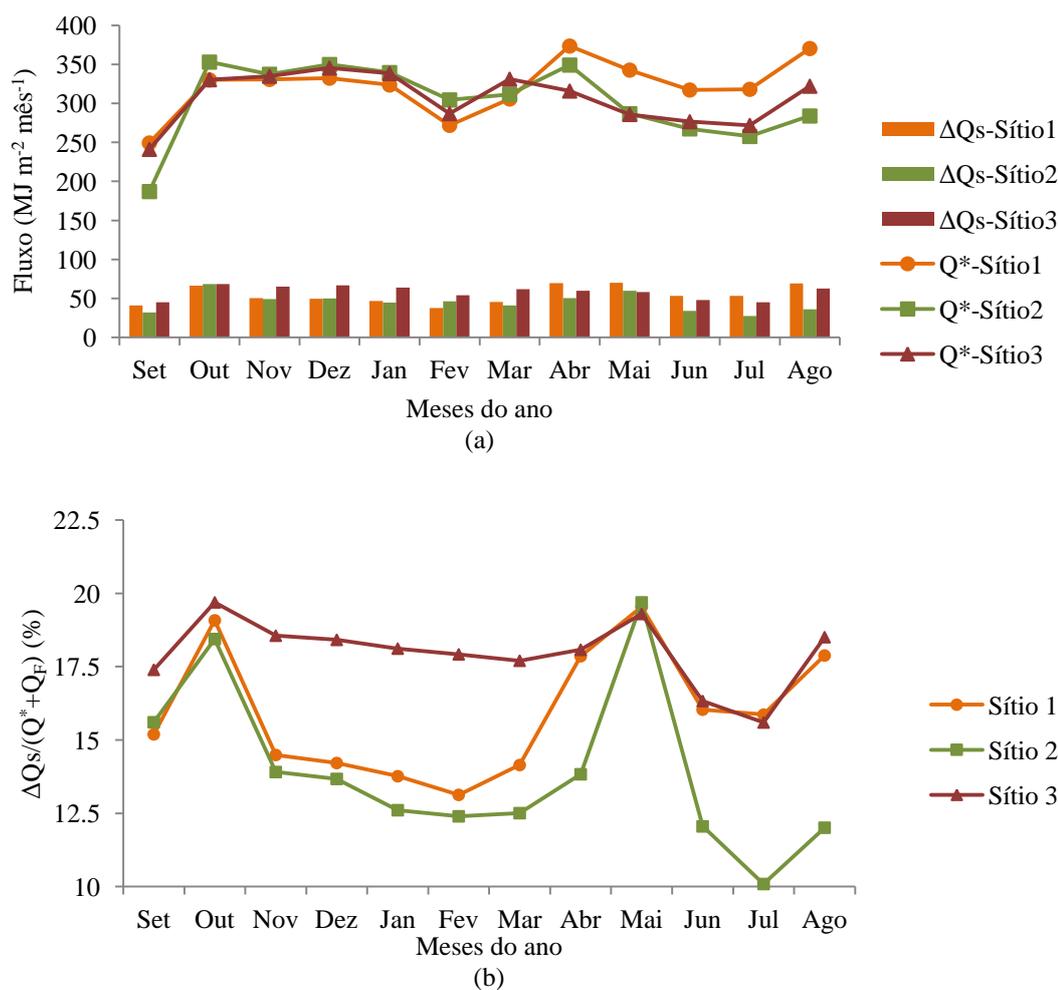


Figura 56 – (a) Variação sazonal do fluxo de calor armazenado no dossel urbano e (b) razão entre ΔQ_S e $Q^* + Q_F$ para os Sítios 1, 2 e 3

No Sítio 2, o valor mínimo mensal ocorreu no mês de julho com $27,71 \text{ MJ m}^{-2}\text{mês}^{-1}$ ($0,89 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) e o valor máximo em outubro com intensidade de $68,39 \text{ MJ m}^{-2}\text{mês}^{-1}$ ($2,20 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) (Figura 56a). A menor fração entre a energia armazenada dentro do dossel e a energia disponível no meio aconteceu em julho com 10,09% e a maior em maio, com 19,69% (Figura 56b). A média anual de ΔQ_S correspondeu a aproximadamente a 14,12% da energia disponível no meio ($Q^* + Q_F$), enquanto no período seco e úmido, as relações observadas foram de 15,77 e 14,18%, respectivamente. Os resultados encontrados indicam que este sítio urbano apresentou as menores taxas de armazenamento entre os sítios estudados.

No Sítio 3, o valor mínimo mensal ocorreu no mês de julho com $44,98 \text{ MJ m}^{-2}\text{mês}^{-1}$ (ou $1,45 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) e o valor máximo em outubro com intensidade de $68,53 \text{ MJ m}^{-2}\text{mês}^{-1}$ (ou valor médio diário de $2,21 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) (Figura 56a). A menor fração entre a energia armazenada dentro do dossel e a energia disponível no meio aconteceu em julho com 15,59% e a maior em outubro, com 18,69% (Figura 56b). A média anual de ΔQ_S correspondeu a aproximadamente a 18,02% da energia disponível no meio, enquanto no período seco e úmido, as relações observadas foram de 18,94 e 19,05%, respectivamente. Os resultados encontrados indicam que este sítio urbano apresentou as maiores taxas de armazenamento entre os sítios estudados.

Em São Paulo foi observado valor médio mensal mínimo em junho de $-0,15 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ e máximo em dezembro de $4,07 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ (FERREIRA, 2010). Devido ao menor rigor do inverno na região, o calor armazenado dentro do dossel urbano na cidade de Cuiabá não chegou a se tornar negativo como observado em São Paulo. Por outro lado, a intensidade de energia armazenada dentro do dossel urbano de São Paulo chegou a ser 85% superior ao valor mínimo observado nos sítios de Cuiabá. Em Miami, o valor médio mensal observado de maio a junho foi de $2,49 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, valor próximo aos observados em Cuiabá. Em termos médios mensais, o fluxo de calor armazenado no dossel urbano de São Paulo e em Miami corresponderam a aproximadamente 24% e 18% da radiação líquida disponível no meio. O valor de Miami se aproxima muito do observado no Sítio 3 com 18,02%. Em Ouagadougou, Burkina Faso, cidade do oeste da África, com rigor climático semelhante ao observado em Cuiabá, o fluxo de calor armazenado no dossel urbano

chegou a representar 20% do saldo de radiação disponível no meio (OFFERLE et al., 2005). Maitelli (2010), em estudo na região de Cuiabá entre agosto e setembro de 1993, estimou o calor estocado dentro do dossel urbano utilizando como referência o saldo de energia disponível no meio. Segundo a autora, as taxas de calor estocado foram significativas e chegavam a 22% da radiação líquida disponível para o sistema. Nesse mesmo período, ΔQ_S alcançou em média nos sítios pesquisados aproximadamente 17,28% da energia disponível no meio, valor próximo ao observado por Maitelli (2010).

Os Sítios 1, 2 e 3 apresentaram padrões de sazonalidade muito semelhantes. De novembro a fevereiro, observa-se a redução na taxa de energia armazenada dentro do dossel urbano, enquanto de março a maio, observa-se elevação. O primeiro período (primavera e verão) e o segundo (outono) correspondem aos meses em que se observa a elevação e redução da intensidade das chuvas na região, respectivamente. É interessante ressaltar que quanto maior a intensidade das chuvas, maior são as trocas por condução entre a água e as superfícies que compõem o dossel urbano, reduzindo desta forma a intensidade do calor armazenado no dossel urbano.

Por outro lado, observa-se que parte da energia disponível no meio é utilizada para evaporar a água presente no ambiente urbano (solo, paredes, telhado) durante esta época do ano. De junho a julho, nota-se novamente que ocorre o declínio da energia armazenada dentro do dossel urbano, agora em virtude do início da estação de inverno onde se observa a entrada de frentes frias na região. De agosto a outubro, a medida que a estação de inverno chega ao fim e a estação da primavera se inicia, constata-se a elevação da energia armazenada em virtude da maior disponibilidade de energia para aquecer o dossel urbano durante essa época do ano. Desta forma, constata-se em todos os sítios avaliados elevação das intensidades de ΔQ_S nos meses secos e decréscimo da intensidade nos meses úmidos. Exceção são os meses de junho a agosto, onde se observa maior dissipação de energia para fora do dossel urbano, resultado do resfriamento provocado pelas frequentes entradas de frentes frias na região durante esta época do ano (inverno).

A sazonalidade de ΔQ_S observada em São Paulo difere em termos de padrão da observada nos sítios de Cuiabá. De janeiro a junho observa-se redução da intensidade de ΔQ_S , que se torna negativa em junho. De julho a dezembro, observa-

se comportamento contrário, ou seja, elevação de ΔQ_S . Não se observa relação entre as estações do ano e padrão observado no sítio de São Paulo. Não foi possível comparar a sazonalidade dos dados de Miami e Ouagadougou visto que os estudos realizados naqueles sítios ocorreram apenas durante o período de verão na região.

Percebe-se que existe relação entre variação sazonal de ΔQ_S com o ciclo anual do saldo de radiação nos sítios estudados. No entanto, esta relação não é direta, ou seja, em alguns casos apesar da energia disponível no meio se elevar ou diminuir, não se observa elevação ou redução de forma proporcional na energia armazenada dentro dossel urbano. Isso acontece porque a histerese existente entre a energia que entra (Q^*) e a que é armazenada (ΔQ_S) é função das características físicas dos materiais presentes no entorno dos sítios, bem como das características da cobertura de céu de cada local estudado. A umidade e as características do solo também influenciam no processo de conversão da energia.

A variação diária dos valores horários médios mensais para o fluxo de calor armazenado no dossel urbano (ΔQ_S) e o saldo de radiação disponível no meio (Q^*) podem ser visualizados na Figura 57 para o período seco e na Figura 58 para o período úmido nos Sítios 1, 2 e 3, respectivamente.

Ao se analisar o comportamento no Sítio 1, observa-se que os valores máximos diurnos de ΔQ_S em média ocorreram às 12h30min com intensidade de $148,36 \text{ W m}^{-2}$ no período da seca e às 11h 30min com intensidade de $134,90 \text{ W m}^{-2}$ no período úmido. Os valores médios máximos diurnos da radiação líquida (Q^*) foram observados às 12h no período seco com intensidade de $520,94 \text{ W m}^{-2}$ e às 11h30min no período úmido com intensidade de $510,22 \text{ W m}^{-2}$. Diante do exposto, nota-se que a variação de ΔQ_S se encontra em fase com Q^* , tanto no período seco quanto no úmido. O valor médio diário de ΔQ_S foi de $1,91 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no período seco e $1,64 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no úmido, com média anual de $1,78 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$.

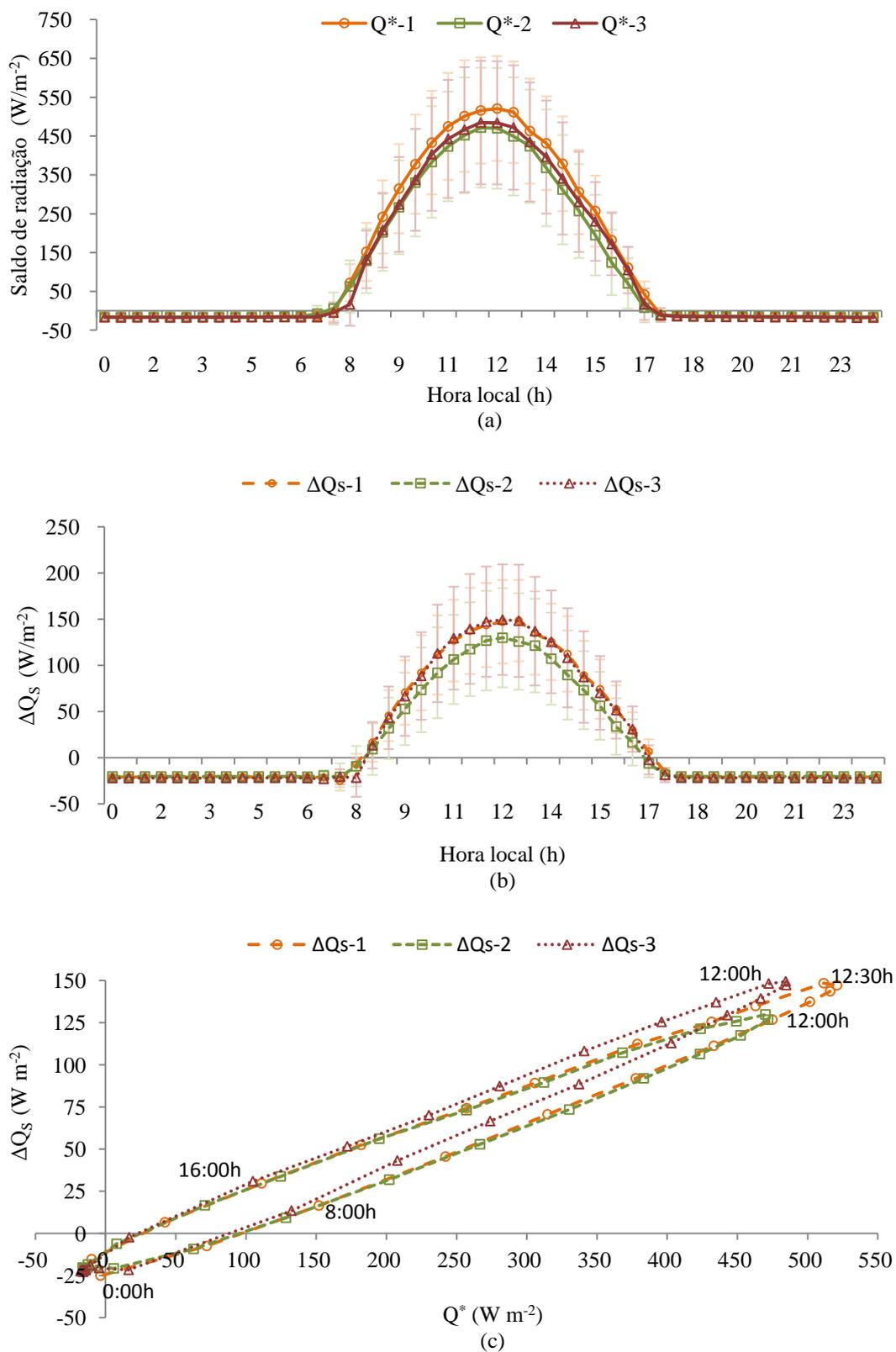


Figura 57 – Variação média diária da radiação líquida (Q^*) / fluxo de calor armazenado no dossel urbano (ΔQ_s) e diagrama de dispersão entre ΔQ_s e o Q^* para os Sítios 1, 2 e 3 no período seco

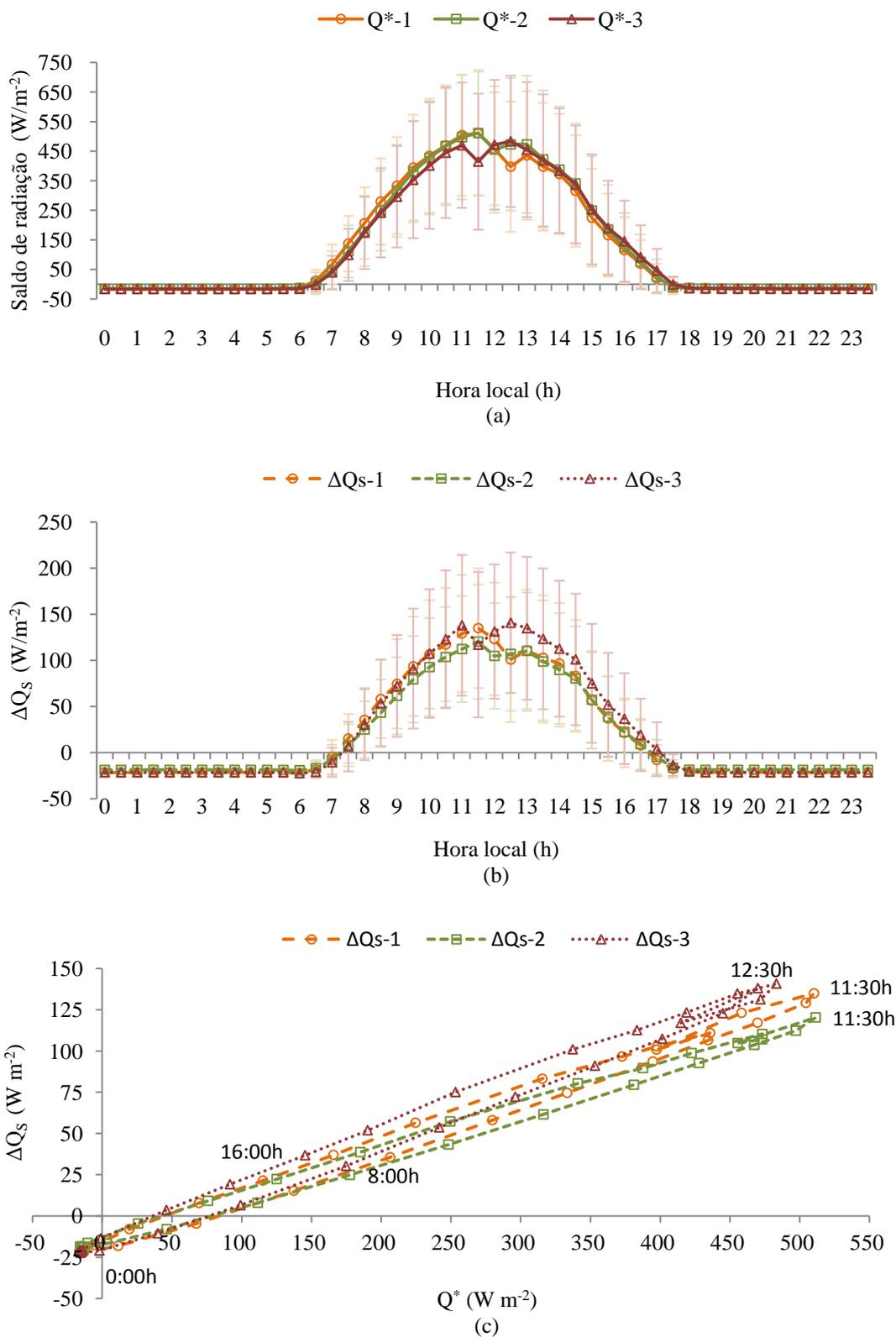


Figura 58 – Variação média diária da radiação líquida (Q^*) / fluxo de calor armazenado no dossel urbano (ΔQ_s) e diagrama de dispersão entre ΔQ_s e o Q^* para os Sítios 1, 2 e 3 no período úmido

No Sítio 2, constata-se que os valores máximos diurnos de ΔQ_S em média ocorreram às 12 horas com intensidade de $129,82 \text{ W m}^{-2}$ no período da seca e às 11h30min com intensidade de $120,72 \text{ W m}^{-2}$ no período úmido. Os valores médios máximos diurnos da radiação líquida (Q^*) foram observados às 11h30min no período seco com intensidade de $471,79 \text{ W m}^{-2}$ e às 11h30min no período úmido com intensidade de $511,45 \text{ W m}^{-2}$. Desta forma, percebe-se que a variação de ΔQ_S se encontra atrasado em 0,5h (defasagem de fase) em relação a Q^* no período seco e em fase no período úmido. O valor médio diário de ΔQ_S foi de $1,40 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no período seco e $1,52 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no úmido. Estes valores são 39% e 8,5% inferiores aos observados no Sítio 1 no período seco e úmido, respectivamente. O Sítio 2 foi a que apresentou menor média anual com $1,46 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, 22,75% inferior a média anual do Sítio 1.

No Sítio 3, verifica-se que os valores máximos diurnos de ΔQ_S em média ocorreram às 12h com intensidade de $148,43 \text{ W m}^{-2}$ no período da seca e às 12h30min com intensidade de $140,75 \text{ W m}^{-2}$ no período úmido. Os valores médios máximos diurnos de saldo de radiação (Q^*) foram observados às 11h30min no período seco com intensidade de $484,77 \text{ W m}^{-2}$ e às 12h30min no período úmido com intensidade de $483,27 \text{ W m}^{-2}$. Desta forma, percebe-se que a variação de ΔQ_S se encontra atrasado em 0,5h (defasagem de fase) em relação a Q^* no período seco e em fase no período úmido. O valor médio diário de ΔQ_S foi de $1,76 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no período seco e $2,05 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no úmido. Estes valores são 6% inferior e 18% superior aos observados no Sítio 1 e 44 e 28% superiores aos observados no Sítio 2, no período seco e úmido, respectivamente. O Sítio 3 foi o que apresentou maior média anual com $1,91 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, 7% superior ao Sítio 1 e 30% superior ao Sítio 2.

Em estudos realizados em cidades localizadas em clima temperado, verificou-se que ΔQ_S apresenta adiantado (avanço de fase) em aproximadamente 1h em relação a Q^* (GRIMMOND e OKE, 1998). Ferreira (2010) encontrou comportamento semelhante na cidade de São Paulo, talvez porque tenha utilizado na estimativa de ΔQ_S os coeficientes determinados para cidades de outras latitudes.

Como se pode verificar nas Tabelas E, F e G em anexo, as taxas de conversão da energia disponível no meio para o dossel urbano avaliada para as regiões em estudo ($a_1 = 0,30, 0,29$ e $0,31$) são inferiores a determinada para a cidade

de São Paulo ($a_1 = 0,58$), o que indica que nesses sítios houve menor transferência de energia da energia disponível no meio para o dossel urbano. Por outro lado, o valor médio anual de a_2 é igual a $-0,13$, $-0,14$ e $-0,14$, o que indica uma relação de fase entre a energia disponível no meio e fluxo de calor armazenado no dossel urbano, não existindo o efeito de histerese. Isso é mais facilmente visualizado nas Figuras 57b e 58b.

Na Figura 57c e Figura 58c é possível observar que a trajetória diurna elíptica de ΔQ_S em função de Q^* acontece no sentido anti-horário e que praticamente não existe o efeito de histerese, estando o calor armazenado no dossel urbano em fase com o saldo de energia disponível no meio. Este comportamento diverge dos observados nas cidades de clima temperado e na cidade de São Paulo visto que nestes locais foram observadas trajetórias no sentido horário e que o ΔQ_S atinge o valor máximo antes de Q^* (FERREIRA, 2010; OKE e CLEUGH, 1987).

Assim, constata-se nos sítios urbanos estudados que o processo de conversão da energia disponível no meio se dá de forma mais lenta do que as observadas em cidades de latitudes elevadas. É importante frisar que a histerese está associada às características físicas dos materiais que se encontram no meio, tais como condutividade térmica, calor específico, coeficiente de difusividade térmica, bem como a umidade presente no mesmo (OKE, 1987). Como estes parâmetros não foram avaliados neste estudo, não é possível identificar com maior profundidade as causas dos efeitos observados nos sítios estudados. Outros fatores que influenciam na resposta dada pela superfície à entrada de energia conforme destaca Ferreira (2010) são a latitude e a cobertura de nuvens existente no local de estudo.

Ao se confrontar as taxas médias do calor armazenado no dossel urbano com as características morfológicas do entorno de cada sítio urbano, é possível estabelecer relações entre ΔQ_S e a fração de área plana impermeabilizada e vegetada no período seco (linha tracejada vermelha) e período úmido (linha pontilhada azul) (Figura 59). Nota-se que o calor armazenado no dossel urbano no período seco cresce praticamente de forma linear com fração de área impermeabilizada e decresce com o aumento da taxa de vegetação no entorno dos sítios. A presença de baixa umidade no meio nesse período torna o armazenamento dentro do dossel urbano mais dependente das características físicas dos materiais presentes no entorno desses

sítios urbanos. Por outro lado, no período úmido, verifica-se que o calor armazenado dentro do dossel apresentou comportamento não linear com o acréscimo da fração de área impermeabilizada e decréscimo com a fração de área vegetada. Este comportamento pode ser explicado devido a maior taxa de evapotranspiração que ocorre no período úmido em virtude da área vegetada e permeável presente nos sítios, em especial no entorno do Sítio 2.

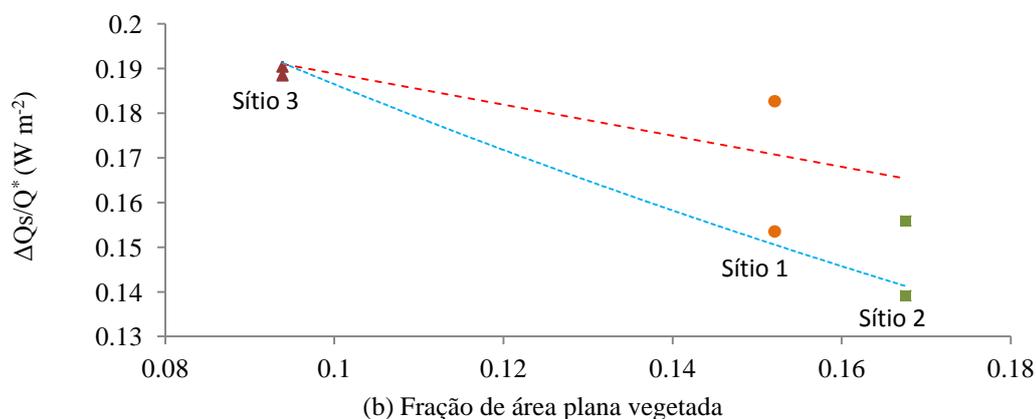
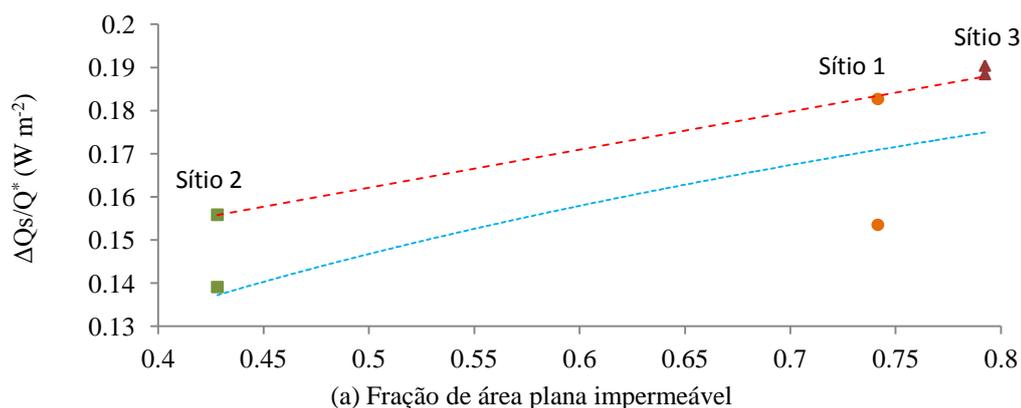


Figura 59– Taxa média de ΔQ_s em função da fração de área plana impermeabilizada e vegetada no período seco (linha tracejada) e úmido (linha pontilhada)

5.4.3 Comparação Interurbanas entre os Sítios

O teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) indicou que as distribuições de ΔQ_s nos sítios estudados não apresentam distribuição normal, o que levou a utilização do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis com a finalidade de comparar estatisticamente os valores de ΔQ_s estimados. A estatística de Kruskal-Wallis indicou que existem diferenças significativas entre os valores dos fluxos de calor armazenado dentro do dossel urbano estimados para as áreas de estudo ($p < 0,05$), tanto na estação seca quanto na chuvosa (Tabela B em anexo). As diferenças observadas são resultado das

características morfológicas do entorno de cada sítio urbano, bem como das propriedades físicas dos materiais que se encontram nas áreas urbanizadas, tais como condutividade térmica, calor específico, coeficiente de difusividade térmica, bem como a umidade presente no meio, conforme já relatado no item 5.4.2.

A diferença anual entre a energia armazenada dentro do dossel urbano entre os Sítios 1-2, 1-3 e 2-3 foi de $116,95 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, $-46,19 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e $-163,15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Desta forma, constata-se que o Sítio 3 foi o que mais armazenou energia dentro do dossel urbano, seguido dos Sítios 1 e 2. Como apresentado, a capacidade de armazenamento de cada sítio estudado se relacionou diretamente com a taxa de impermeabilização e inversamente com a taxa de vegetação presente em seu entorno.

Pela análise da Figura 60, nota-se que as diferenças entre os Sítios 1 e 2 acompanham o comportamento sazonal de chuvas na região, ou seja, durante o período úmido, as diferenças entre as energias armazenadas nos sítios se reduziram, enquanto no período seco, as diferenças se elevaram consideravelmente, atingindo valor máximo em agosto com $33,10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. Comportamento semelhante foi observado entre os sítios 1-3, onde se observa diferenças negativas no período úmido com valor máximo de $-17,40 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ no mês de janeiro, e diferenças positivas no período seco com valor máximo de $11,83 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ no mês de maio. O Sítio 3 em quase todos os meses armazenou mais energia que o Sítio 2. A máxima diferença negativa observada em agosto com $26,58 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$.

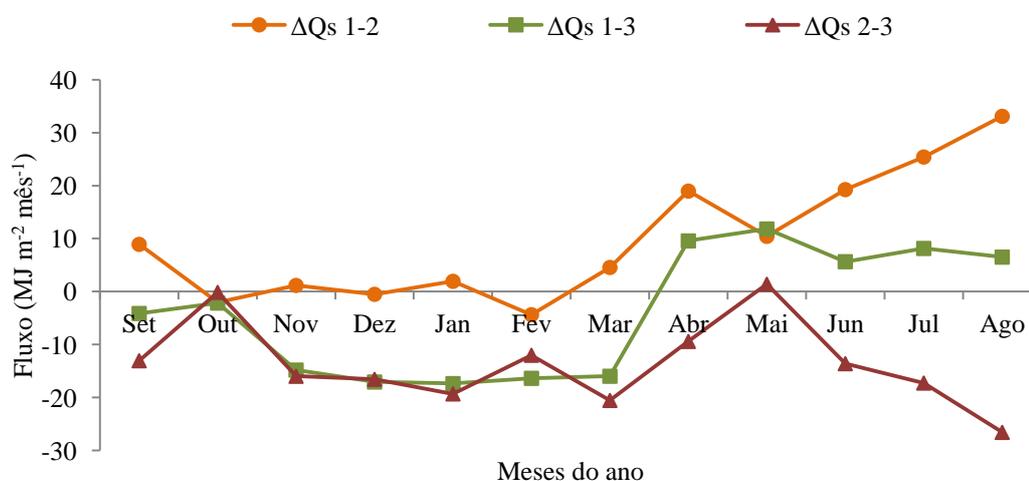


Figura 60 – Variação sazonal da diferença de energia armazenada dentro do dossel urbano nos Sítios 1, 2 e 3

5.5 RADIAÇÃO LÍQUIDA DISPONÍVEL NO MEIO (Q^*)

5.5.1 Variação Sazonal e Diária da Radiação Líquida nos Sítios 1, 2 e 3

A radiação líquida acumulada no período pesquisado alcançou o valor de $3866,50 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, $3628,65 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e $3681,15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ nos Sítios 1, 2 e 3, respectivamente, o que corresponde a 61,65, 58,15 e 59,75% de R_g .

Ao se analisar a variação sazonal da radiação líquida no meio no Sítio 1 (Figura 61a), é possível perceber que o valor mínimo mensal foi avaliado no mês de setembro com $249,39 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ (valor médio diário de aproximadamente $8,31 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e o valor máximo em abril com intensidade de $273,60 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ ($12,45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). A menor fração entre a radiação líquida no meio e a radiação global incidente aconteceu em setembro (42,14%) e a maior em novembro (70,95%) (Figura 61b). A média anual de Q^* correspondeu a aproximadamente a 61,65% da radiação global incidente, enquanto no período seco e úmido, as relações observadas foram de 60,25 e 63,11%, respectivamente. As maiores de frações entre Q^* e R_g foram observadas neste sítio urbano.

No Sítio 2, o valor mínimo mensal foi avaliado no mês de setembro com $187,11 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ ($6,23 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e o valor máximo em dezembro com intensidade de $349,95 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ ($11,66 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). A menor fração entre a radiação líquida no meio e a radiação global incidente aconteceu em setembro (36,79%) e a maior em novembro (64,83%). A média anual de Q^* correspondeu a aproximadamente a 57,79% da radiação global incidente, enquanto no período seco e úmido, as relações observadas foram de 52,28 e 62,16%, respectivamente. As menores frações entre Q^* e R_g foram observadas neste sítio.

No Sítio 3, o valor mínimo mensal foi avaliado no mês de setembro com $241,20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ ($8,04 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e o valor máximo em dezembro com intensidade de $345,45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ ($11,51 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). A menor fração entre a radiação líquida no meio e a radiação global incidente aconteceu em setembro (46,54%) e a maior em março (67,69%). A média anual de Q^* correspondeu a aproximadamente a 59,76% da radiação global incidente, enquanto no período seco e úmido, as relações observadas foram de 57,07 e 62,35%, respectivamente. Este sítio apresentou frações intermediárias entre os demais sítios urbanos pesquisados.

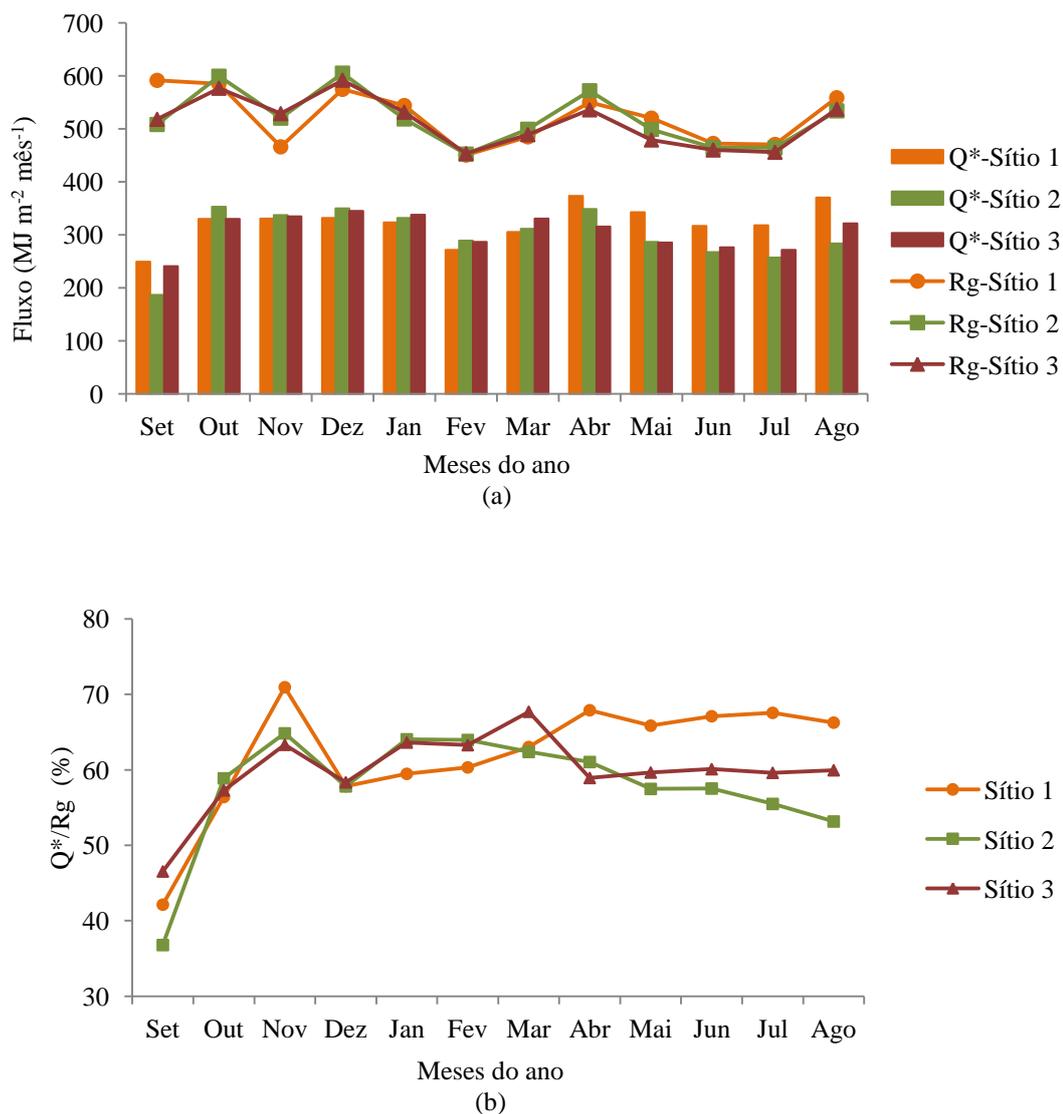


Figura 61 – (a) Variação sazonal da radiação líquida e (b) razão entre Q^* e R_g nos Sítios 1, 2 e 3

Em São Paulo foi observado valor médio mensal mínimo em junho de $4,83 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e máximo em dezembro de $12,10 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ (FERREIRA, 2010). Em Miami, o valor médio mensal observado entre maio a junho foi de $13,74 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$. Biudes (2008) em estudo em área pastagem na proximidade de Cuiabá encontrou valor médio mensal mínimo em julho de $7,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e máximo em março de $14,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$. Em termos de média anual, verificou-se que Q^* correspondeu a 80,50% da radiação global incidente e em termos sazonais, 69,6% na estação seca e 91,4% na úmida.

Os valores registrados para radiação solar direta incidente em São Paulo e em Miami não foram apresentados pelos autores, o que impediu a comparação da relação Q^*/R_g com os obtidos na cidade de Cuiabá. Ao se consultar os dados apresentados por Maitelli (2010), constata-se que Q^* correspondeu a aproximadamente 61,96% da radiação global incidente no período de agosto e setembro. Os resultados encontrados nos sítios pesquisados se aproximam mais dos valores registrados por Maitelli (2010) do que os obtidos por Biudes (2008). Segundo Ferreira (2010), a radiação líquida varia muito pouco em relação às regiões naturalmente vegetadas (não urbanizadas) e devido ao efeito combinado de radiação de ondas curtas e longas geralmente o saldo de radiação líquida em superfícies urbanizadas são ligeiramente maiores que as verificadas em regiões rurais adjacentes.

Ao se confrontar a radiação solar incidente com a radiação líquida disponível no meio, percebe-se que existe relação direta entre variação sazonal de Q^* com o ciclo anual da radiação solar incidente e que os Sítios 1, 2 e 3 apresentaram padrões de sazonalidade muito semelhantes (Figura 61a). De outubro a fevereiro, observa-se ligeira redução na radiação solar incidente e da radiação líquida disponível no meio, enquanto de março a abril, observa-se elevação. No entanto, observa-se que tanto a R_g quanto Q^* foram mais influenciados pela nebulosidade e umidade do ar durante o período de chuvas. De maio a julho, nota-se novamente que ocorre o declínio tanto da radiação solar incidente quanto da radiação líquida, justificado pela declinação solar e pelo maior afastamento terra-sol. Em agosto, nota-se que tanto que R_g e Q^* se elevaram, mas em setembro, houve redução destas variáveis, justificado pela fato de nesse período as medições foram realizadas sob a influencia de queimadas na região, que introduziu partículas e fumaça na atmosfera, reduzindo a penetração de radiação solar direta, conseqüentemente, reduzindo Q^* .

A sazonalidade de Q^* observada em São Paulo difere em termos de padrão da observada nos sítios de Cuiabá. De janeiro a junho observa-se redução da intensidade de Q^* e de julho a dezembro, observa-se comportamento contrário, ou seja, elevação de Q^* . O padrão observado coincide com o avaliado por Biudes (2008). Não foi possível comparar a sazonalidade os dados de Miami e Ouagadougou visto que os estudos realizados naqueles sítios ocorreram apenas durante o período de verão na região.

A variação diurna dos valores horários médios mensais para a radiação líquida disponível no meio (Q^*) e a radiação solar incidente (R_g) pode ser visualizado na Figura 62 para o período seco e na Figura 63 para o período úmido nos Sítios 1, 2 e 3, respectivamente. Ao se analisar o comportamento no Sítio 1, observa-se que os valores máximos diurnos de Q^* em média ocorreram às 12h com intensidade de $520,94 \text{ W m}^{-2}$ no período da seca e às 11h30min com intensidade de $510,22 \text{ W m}^{-2}$ no período úmido. Os valores médios máximos diurnos de radiação solar incidente (R_g) foram observados às 12h no período seco com intensidade de $594,50 \text{ W m}^{-2}$ e às 11h no período úmido com intensidade de $663,74 \text{ W m}^{-2}$. Assim, nota-se que a variação de Q^* se encontra em fase com R_g no período seco e defasado (atraso de fase) em 0,5h no período úmido. O valor médio diário de Q^* foi $10,46 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no período seco e $10,64 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no úmido, com média anual de $10,55 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$.

No Sítio 2, constata-se que os valores máximos diurnos de Q^* em média ocorreram às 11h30min com intensidade de $471,79 \text{ W m}^{-2}$ no período da seca e às 11h30min com intensidade de $511,45 \text{ W m}^{-2}$ no período úmida. Os valores médios máximos diurnos de R_g foram observados às 12h no período seco com intensidade de $679,41 \text{ W m}^{-2}$ e às 11h30min no período úmido com intensidade de $740,05 \text{ W m}^{-2}$. Desta forma, percebe-se que a variação de Q^* se encontra adiantado (avanço de fase) em 0,5h em relação a R_g no período seco e em fase no período úmido. O valor médio diário de Q^* foi de $8,87 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no período seco e $10,82 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no úmido. Estes valores são 15% inferior e 1,5% superior aos observados no Sítio 1 no período seco e úmido, respectivamente. A Sítio 2 foi a que apresentou menor média anual com $9,84 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, 7% inferior a média anual do Sítio 1.

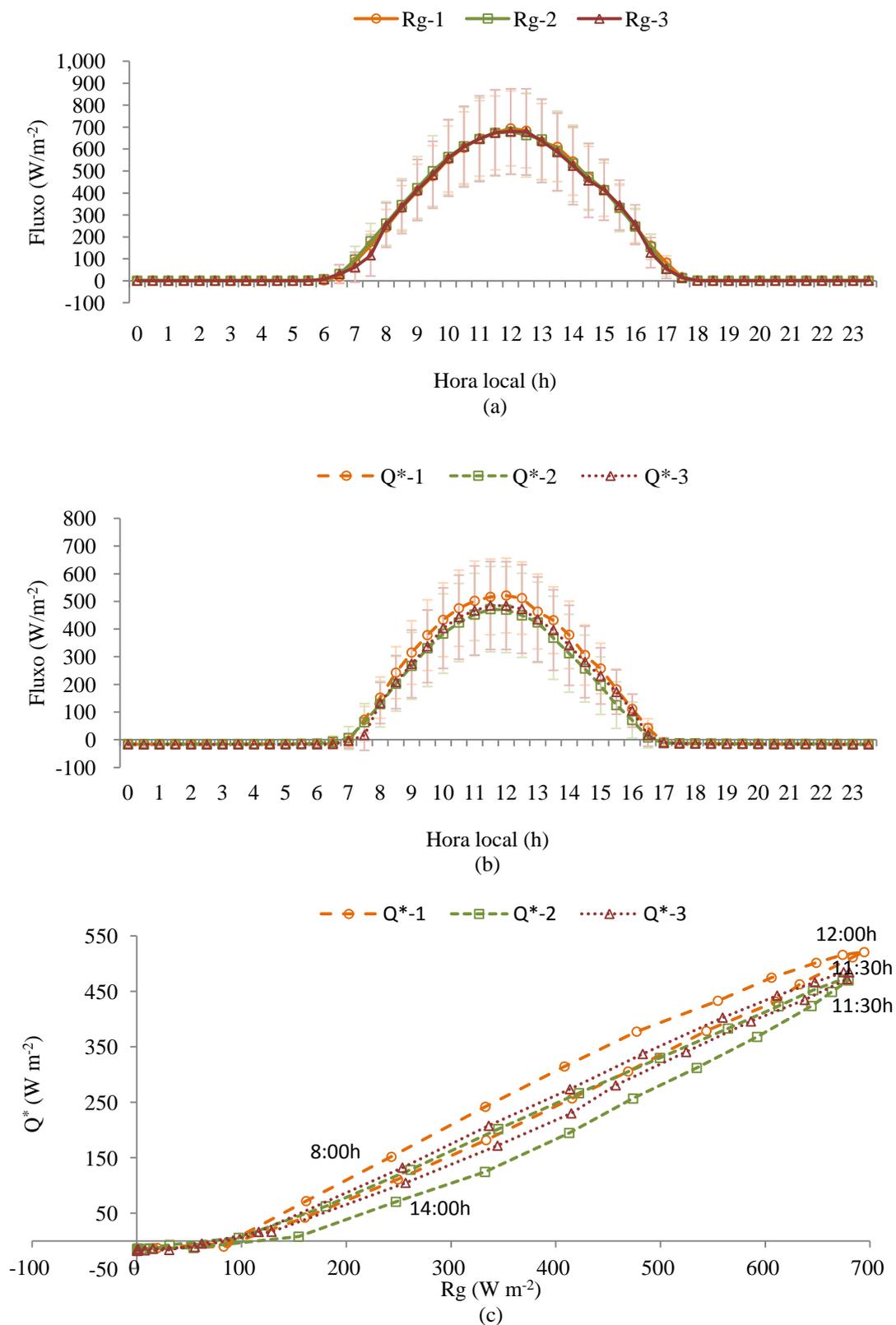


Figura 62 – Variação média diária da radiação direta incidente (R_g) / radiação líquida (Q^*) e diagrama de dispersão entre R_g e Q^* para os Sítios 1, 2 e 3 no período seco

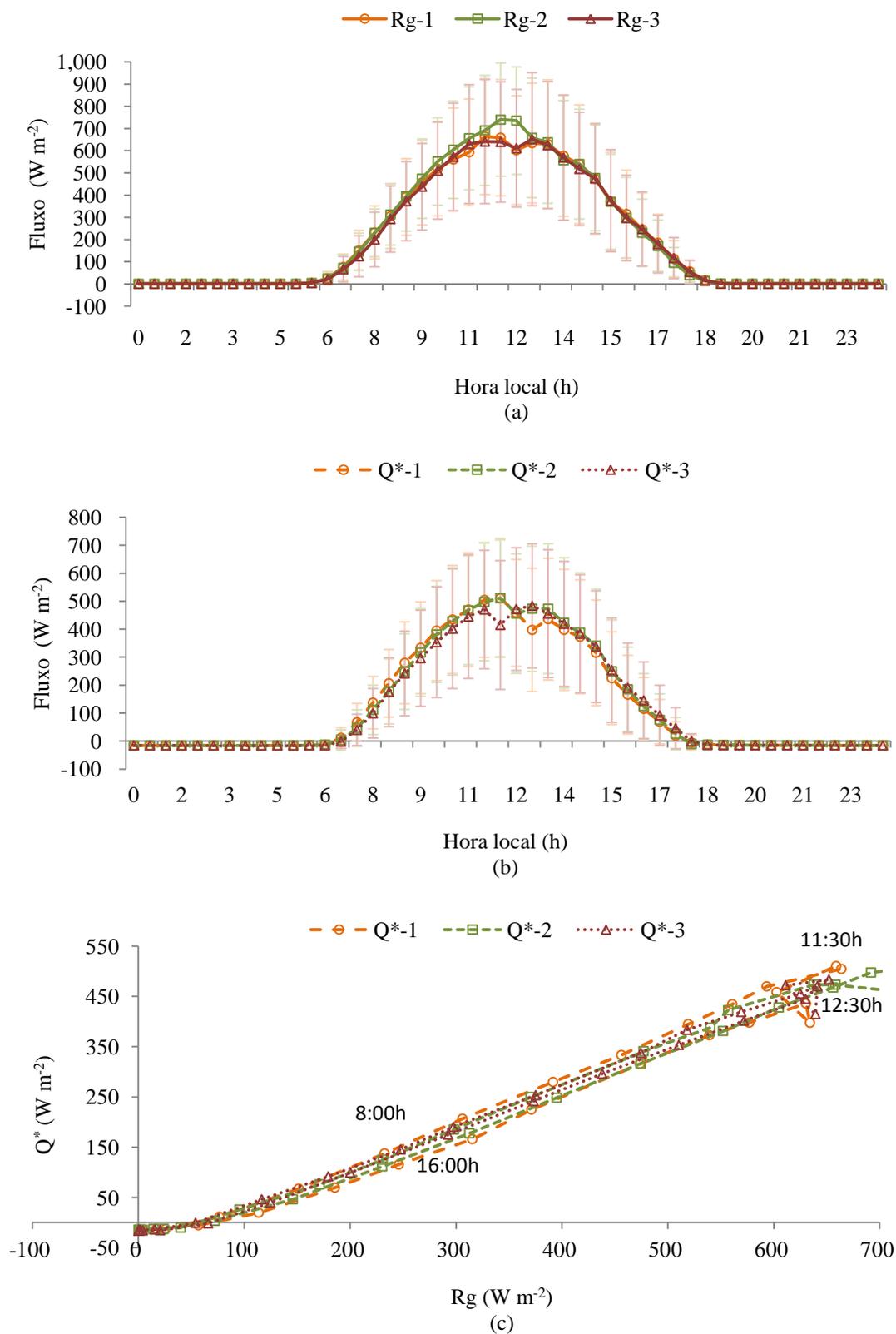


Figura 63 – Variação média diária da radiação direta incidente (R_g) / radiação líquida (Q^*) e diagrama de dispersão entre R_g e Q^* para os Sítios 1, 2 e 3 no período úmido

No Sítio 3, verifica-se que os valores máximos diurnos de Q^* em média ocorreram às 11h30min com intensidade de $484,77 \text{ W m}^{-2}$ no período da seca e às 12h30min com intensidade de $483,27 \text{ W m}^{-2}$ no período úmido. Os valores médios máximos diurnos de R_g foram observados às 12h no período seco com intensidade de $680,20 \text{ W m}^{-2}$ e às 12h30min no período úmido com intensidade de $652,07 \text{ W m}^{-2}$. Desta forma, percebe-se que a variação de Q^* se encontra adiantado (avanço de fase) em 0,5h em relação a Q^* no período seco e em fase no período úmido. O valor médio diário de Q^* foi de $9,38 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no período seco e $10,78 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no úmido. Estes valores são 10% inferior e 1,5% superior aos observados no Sítio 1 e 6% e 0,5% superiores aos observados no Sítio 2, no período seco e úmido, respectivamente. O Sítio 3 apresentou média anual intermediária com $10,08 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, 4,5% inferior ao Sítio 1 e 2,5% superior ao Sítio 2.

Ferreira (2010) encontrou no período diurno valor máximo de Q^* igual a 452 W m^{-2} em agosto e 520 W m^{-2} em fevereiro, ambos às 13h, período representativo das estações seca e úmida, respectivamente. A radiação líquida média diária apresentou valor mínimo em junho com aproximadamente $4,83 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ e máximo em dezembro com $12,10 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. Como se pode observar, os resultados encontrados nesta pesquisa estão coerentes com os apresentados para São Paulo, com exceção do valor mínimo de radiação líquida, que devido à presença de queimadas no período, reduziu a intensidade média mínima mensal no mês de setembro para $7,73 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. Biudes (2008) verificou que a intensidade de Q^* alcançou $574,6 \text{ W m}^{-2}$ e $586,0 \text{ W m}^{-2}$ na estação seca e úmida na região de pastagem próxima a cidade de Cuiabá. Em Miami e Ouagadougou os valores de Q^* alcançaram valores máximos de aproximadamente 570 W m^{-2} e 500 W m^{-2} , respectivamente. As radiações líquidas médias diárias não foram disponibilizadas em Miami e Ouagadougou, o que impediu a comparação com os dados deste trabalho.

5.5.2 Comparação Interurbanas entre os Sítios

O teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) indicou que as distribuições de Q^* nos sítio estudados não apresentam distribuição normal, o que levou a utilização do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis com a finalidade de comparar estatisticamente os valores de Q^* avaliados nos sítios urbanos. A estatística de Kruskal-Wallis indicou que existem diferenças significativas entre os valores da radiação líquida no meio

estimados para as áreas de estudo ($p < 0,05$), tanto na estação seca quanto na úmida (Tabela B em anexo) A Figura 64 apresenta as diferenças observadas nos valores mensais de Q^* entre as áreas de estudo, que podem ser atribuídas a alguns fatores que serão detalhados e discutidos na sequência.

A diferença anual entre a radiação líquida no meio nos Sítios 1-2, 1-3 e 2-3 foi de $237,85 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($0,65 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), $185,19 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($0,51 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e $-52,50 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($-0,14 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Desta forma, constata-se que o Sítio 1 foi o que apresentou maior disponibilidade de energia no meio seguido dos Sítios 3 e 2, respectivamente. As variações observadas na radiação líquida basicamente são devidas às diferenças na transmissividade e emissividade efetiva da atmosfera, nas propriedades térmicas do dossel urbano e albedo efetivo da superfície. Estes parâmetros são responsáveis por alterar os componentes da radiação de onda curta e longa das superfícies urbanizadas ($Q^* = K_{\downarrow} - K_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow}$).

A transmissividade está relacionada com a presença de aerossóis, gases traços e conteúdo de umidade e da quantidade e tipo das nuvens, parâmetros não avaliados durante o período do estudo realizado. Teoricamente, as regiões mais centrais das grandes cidades devem exibir maior poluição atmosférica, o que reduziria a entrada de radiação de ondas curtas direta (K_{\downarrow}) e, conseqüentemente, a radiação líquida no meio, fato este que não ocorreu nos dados avaliados nesta pesquisa, visto que a região mais central houve maior disponibilidade de energia.

Outro aspecto a ser considerado é a variação sazonal da radiação líquida entre os sítios (Figura 64). Uma possível justificativa para o comportamento observado pode ser atribuída às nuvens visto que estas apresentam forte influência na transmissividade e emissividade da atmosfera, modificando a entrada de radiação de onda curta (K_{\downarrow}) e longa (L_{\downarrow}). Como os sítios urbanos estão localizados em áreas diferentes da cidade, a passagem das nuvens sobre os sítios pode ter ocasionado modificações na transmissividade e emissividade das atmosferas locais, alterando desta forma a radiação líquida nos sítios pesquisados.

Ao se admitir um nível de contribuição de 95% para o saldo radiômetro instalados a 3,75 m de altura dentro dos cânions urbanos dos pátios das escolas, constata-se que estes ficaram influenciados por uma área de contribuição com raio de aproximadamente 22m. Dentro desta área, a forma geométrica do cânion e os

diferentes tipos de materiais presentes dentro dos mesmos, entre eles a vegetação, influenciam o saldo radiação líquida. Como os cânions urbanos das escolas apresentam o mesmo formato e materiais construtivos semelhantes, pode-se dizer que a radiação solar refletida (K_{\uparrow}) e a emissão de ondas longas (L_{\uparrow}) pelas superfícies, o aprisionamento de ondas curtas, o efeito das propriedades térmicas e do albedo destes materiais (concreto do pátio, tijolos das paredes da edificação, telha de fibrocimento da cobertura) são muito semelhantes. Desta forma, as diferenças encontradas nas intensidades e na sazonalidade dos dados do saldo de radiação em cada sítio também podem ser atribuídas às diferenças encontradas nos pátios das escolas, sendo a principal delas, a presença de vegetação arbórea. Enquanto na escola do Sítio 1 não se observa vegetação arbórea no pátio (Figura 22d), na escola do Sítio 2 elas se encontram localizadas próximas e periféricamente ao local do experimento (Figura 24 e 25c). Na escola do Sítio 3, a vegetação arbórea é encontrada periféricamente ao local do experimento (Figura 27). Portanto, as diferenças observadas entre as médias anuais de radiação líquida podem também ser atribuídas às diferenças de vegetação arbórea encontrada em cada sítio urbano pesquisado.

A radiação líquida (Q^*) em áreas vegetadas é dependente do tipo de vegetação existente, do ângulo zenital solar, da estrutura do dossel, do índice de área foliar (IAF), da umidade do solo, entre outros fatores. Desta forma, a presença de vegetação introduz alterações no albedo das áreas urbanizadas, o que modifica a radiação líquida no meio. Em um estudo realizado entre áreas urbanas, suburbanas e rurais, Christen (2005) verificou que os saldos anuais de energia em áreas urbanas mais centrais foram superiores às áreas suburbanas, com maior percentagem de vegetação em seu entorno. Este comportamento se assemelha ao observado nos sítios urbanos estudados, onde o menor saldo de energia foi observado no Sítio 2, com maior proporção de vegetação no seu entorno.

Pela análise da Figura 64, nota-se que as diferenças entre os sítios 1 e 2 acompanham o comportamento sazonal de chuvas na região. De outubro a março, as diferenças entre a radiação líquida disponível nos sítios se tornaram negativas, atingindo máxima diferença no mês de fevereiro com $-32,61 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. De Abril a setembro, observa-se que as diferenças se tornaram positivas, atingindo valor máximo em agosto com $86,46 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. Esse comportamento indica que no

período úmido houve menor disponibilidade de energia no Sítio 2 do que no Sítio 1, e no período seco, ocorre comportamento inverso.

Ao se confrontar o Sítio 1 e 3, nota-se que de outubro a março, as diferenças entre a radiação líquida disponível nos sítios se tornaram negativas, atingindo máxima diferença no mês de março com $-25,42 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. De abril a setembro, constata-se que as diferenças se tornaram positivas, atingindo valor máximo em abril com $57,67 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. O comportamento verificado é semelhante ao observado entre os Sítios 1 e 2.

As relações entre os Sítios 2 e 3 apresentaram comportamento diferente do apresentado entre os Sítios 1-2 e 1-3. Verifica-se que de outubro a maio, exceção março, as diferenças entre a radiação líquida nos sítios foram positivas e atingiram valor máximo em abril com $33,27 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. De junho a setembro, as diferenças tornaram-se negativas, com valor máximo em setembro ($-52,49 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$). Esse comportamento indica que no período úmido houve maior disponibilidade de energia no Sítio 2 do que no Sítio 3, e no período seco, ocorre comportamento inverso.

Conforme já relatado, devido ao efeito combinado de radiação de ondas curtas e longas geralmente a radiação líquida em superfícies urbanizadas são ligeiramente maiores que as verificadas em regiões rurais adjacentes. No entanto, observa-se pela análise dos dados que sazonalmente existe variação no comportamento descrito. No período úmido, observa-se que no Sítio 2 mais vegetado e com menor taxa de impermeabilização, houve maior disponibilidade de energia do que nos Sítios 1 e 3, menos vegetados e com maiores taxas de impermeabilização. Esse comportamento pode ser justificado pela alteração da umidade nos materiais que compõem o dossel urbano e pela alteração dos albedos das áreas estudadas. De fato, a maior disponibilidade água no período úmido altera as propriedades térmicas dos elementos constituintes do dossel urbano, em especial, nos locais menos impermeabilizados, como o caso do Sítio 2.

Com relação ao albedo, várias são as causas responsáveis pela sua variação em uma superfície, entre elas pode-se citar: as variações nas refletâncias da vegetação e do solo, as mudanças na estrutura do dossel das árvores, o índice de área folia (IAF), a variação no ângulo de elevação solar, o teor de umidade do solo, o regime de chuvas, entre outras (BERBET, 2002).

Em estudo realizado em áreas de floresta e pastagem na Amazônia, verificou-se que os valores observados de albedo no período úmido, tanto para pastagem quanto para floresta, foram ligeiramente menores que os valores correspondentes ao período seco (RIBEIRO, 1994), o que contribuiu para elevar o saldo de radiação disponível no período.

Por outro lado, Giambelluca et al. (1999) verificaram que ângulos solar elevados permitem que maiores profundidades sejam atingidas pela luz no interior do dossel de uma floresta, o que contribui para uma maior absorção da radiação incidente, fazendo com que o albedo seja tipicamente menor no verão. Desta forma, os fatores citados podem ter contribuído para que o Sítio 2, mais vegetado e menos impermeável, tenha disponibilizado maior energia no meio do que os Sítios 1 e 3, mais urbanizados. Nota-se que este comportamento se inverte no período da seca, período em que se observa maior disponibilidade de energia nos sítios menos vegetados e mais impermeabilizados. No entanto, o comportamento observado não ficou bem esclarecido visto que os componentes do saldo de energia no meio ($K_{\downarrow} - K_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow}$) não foram avaliados individualmente nos sítios pesquisados.

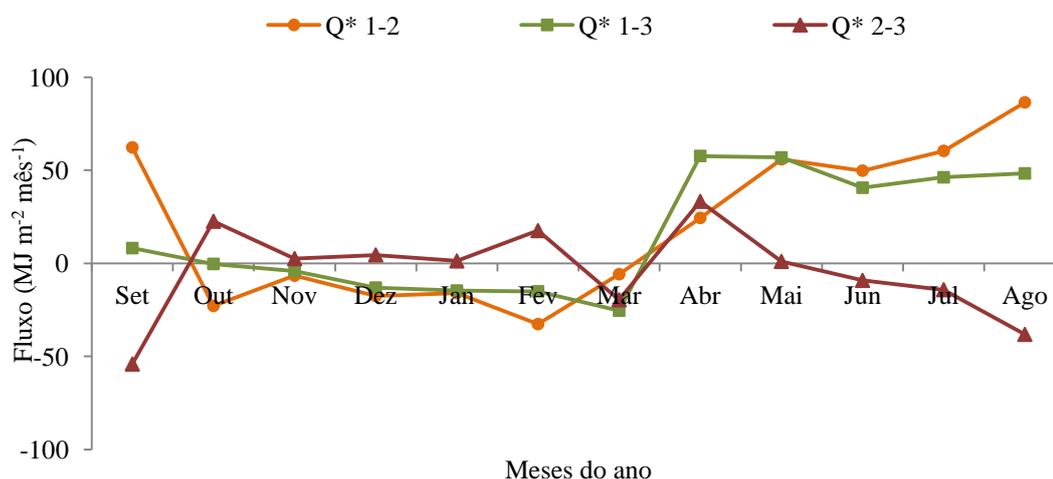


Figura 64 – Variação sazonal da diferença de energia armazenada dentro do dossel urbano nos Sítios 1, 2 e 3

5.6 FLUXOS DE CALOR LATENTE (Q_E) E SENSÍVEL (Q_H)

5.6.1 Variação Sazonal e Diária-Fluxo de Calor Latente e Sensível - Sítios 1, 2 e 3

Os fluxos anuais de calor latente (Q_E) atingiram no período o valor de 1338,12 MJ m⁻² ano⁻¹, 1644,04 MJ m⁻² ano⁻¹ e 1374,93 MJ m⁻² ano⁻¹, enquanto que os fluxos de calor sensível (Q_H) totalizaram 2039,41 MJ m⁻² ano⁻¹, 1589,53 MJ m⁻² ano⁻¹ e 1810,05 MJ m⁻² ano⁻¹ nos Sítios 1, 2 e 3, respectivamente. Com exceção do Sítio 2, menos urbanizado e com maior fração de vegetação em seu entorno, Q_H representa a principal forma de dissipação de energia no meio urbano. A magnitude observada no entorno dos Sítios 1 e 3 chega a ser 50% superior a observada para Q_E .

Ao se analisar a variação sazonal dos fluxos de calor latente no meio no Sítio 1 (Figura 65a), percebe-se que o valor mínimo mensal foi avaliado no mês de setembro com 58,82 MJ m⁻²mês⁻¹ (ou valor médio diário de 1,96 MJ m⁻²dia⁻¹) e o valor máximo em agosto com intensidade de 129,42 MJ m⁻²mês⁻¹ (4,15 MJ m⁻²dia⁻¹). A menor relação entre $Q_E/(Q^*+Q_F)$ ocorreu em setembro com 21,86% e a maior em janeiro, com 37,91% (Figura 65b). A média anual de Q_E correspondeu a aproximadamente a 32,88% do saldo de energia disponível no meio, enquanto no período seco e úmido, as relações observadas foram de 31,16 e 34,59%, respectivamente.

Com relação ao fluxo de calor sensível (Figura 66a), nota-se que o valor mínimo mensal foi observado no mês de fevereiro, com 136,31 MJ m⁻²mês⁻¹ (valor médio diário de 4,86 MJ m⁻²dia⁻¹) e o valor máximo em abril com intensidade de 201,13 MJ m⁻²mês⁻¹ (6,37 MJ m⁻²dia⁻¹). A menor relação entre $Q_H/(Q^*+Q_F)$ aconteceu em outubro com 46,23% e a maior em abril, com 51,86% (Figura 66b). A média anual de Q_H correspondeu a aproximadamente a 50,11% do saldo de energia disponível no meio, enquanto no período seco e úmido, as relações observadas foram de 50,53 e 49,70%, respectivamente. Logo, no Sítio 1 houve predomínio dos fluxos verticais de calor sensível sobre os fluxos de calor latente e nele foram avaliados os maiores fluxos de calor sensível e os menores fluxos de calor latente que os demais sítios pesquisados.

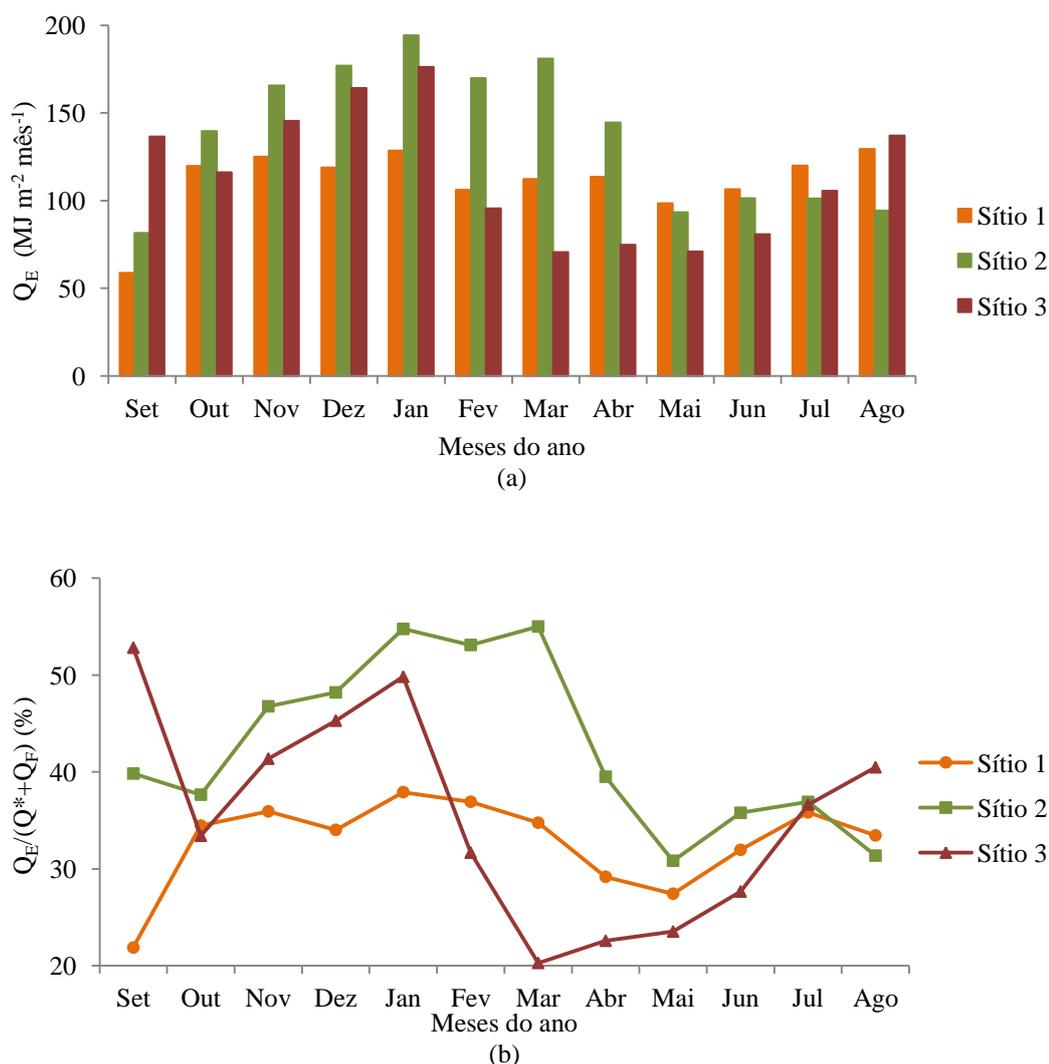


Figura 65 – (a) Variação sazonal dos valores mensais do fluxo de calor latente e (b) razão entre o fluxo de calor latente energia disponível no meio nos Sítios 1, 2 e 3

Ao se analisar a variação sazonal do fluxo de calor latente no Sítio 2 (Figura 65a), percebe-se que o valor mínimo mensal foi avaliado no mês de setembro com $81,52 \text{ MJ m}^{-2} \text{mês}^{-1}$ (valor médio diário de $2,71 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e o valor máximo em janeiro com intensidade de $194,36 \text{ MJ m}^{-2} \text{mês}^{-1}$ ($6,26 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$). A menor relação entre $Q_E/(Q^*+Q_F)$ aconteceu em agosto com $31,36\%$ e a maior em março, com $55,00\%$ (Figura 65b). A média anual de Q_E correspondeu a aproximadamente a $42,94\%$ do saldo de energia disponível no meio, enquanto no período seco e úmido, as relações observadas foram de $35,20$ e $49,36\%$, respectivamente.

Com relação ao fluxo de calor sensível (Figura 66a), nota-se que o valor mínimo mensal foi observado no mês de setembro com $96,97 \text{ MJ m}^{-2} \text{mês}^{-1}$ (valor médio diário de $3,12 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e o valor máximo em abril, com intensidade de

171,73 MJ m⁻²mês⁻¹ (5,53 MJ m⁻²dia⁻¹). A menor relação entre $Q_H/(Q^*+Q_F)$ ocorreu em janeiro com 28,54% e a maior em agosto, com 54,34% (Figura 66b). A média anual de Q_H correspondeu a aproximadamente a 41,51% do saldo de energia disponível no meio, enquanto no período seco e úmido, as relações observadas foram de 49,28 e 35,06%, respectivamente. Logo, no Sítio 2 houve predomínio dos fluxos verticais de calor latente sobre os fluxos de calor sensível e nele foram avaliados os maiores fluxos de calor latente e os menores fluxos de calor sensível que os demais sítios pesquisados.

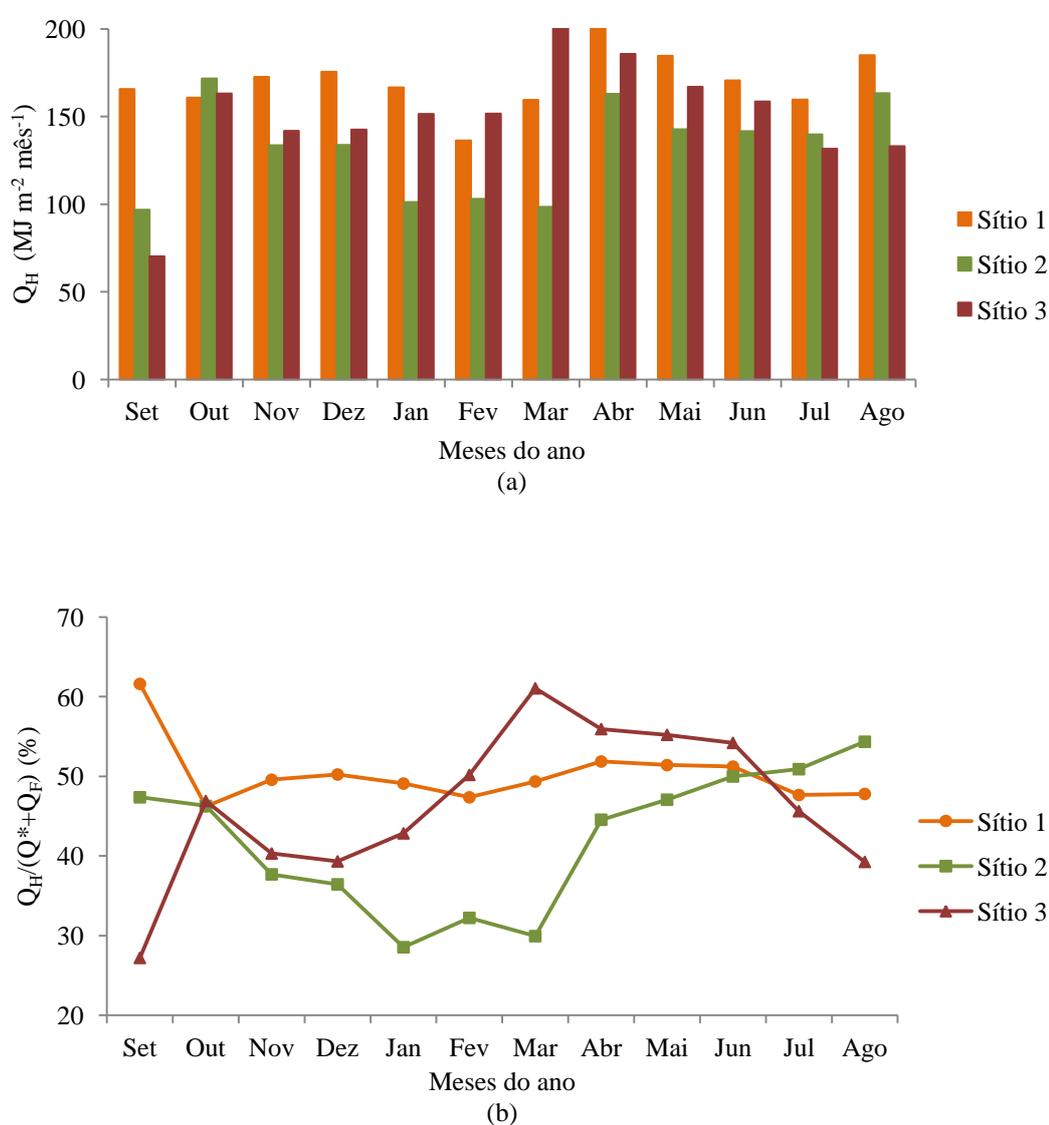


Figura 66 – (a) Variação sazonal dos valores mensais dos fluxos de calor sensível e (b) razão entre o fluxo de calor sensível e a energia disponível no meio nos Sítios 1, 2 e 3

Ao se analisar a variação sazonal do fluxo de calor latente no Sítio 3 (Figura 65a), constatou-se que o valor mínimo mensal ocorreu no mês de março com $70,69 \text{ MJ m}^{-2}\text{mês}^{-1}$ (valor médio diário de $2,28 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) e o valor máximo em janeiro com intensidade de $176,22 \text{ MJ m}^{-2}\text{mês}^{-1}$ (ou valor médio diário de $5,68 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$). A menor relação entre $Q_E/(Q^*+Q_F)$ ocorreu em março com 20,28% e a maior em setembro, com 52,81% (Figura 65b). A média anual de Q_E correspondeu a aproximadamente 35,43% do saldo de energia disponível no meio, enquanto no período seco e úmido, as relações observadas foram de 35,41 e 35,45%, respectivamente.

Com relação aos fluxos de calor sensível (Figura 66a), nota-se que o valor mínimo mensal foi observado no mês de setembro com $70,37 \text{ MJ m}^{-2}\text{mês}^{-1}$ (valor médio diário de $2,34 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) e o valor máximo em março com intensidade de $212,82 \text{ MJ m}^{-2}\text{mês}^{-1}$ ($7,09 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$). A menor relação entre $Q_H/(Q^*+Q_F)$ ocorreu em setembro com 27,20% e a maior em março, com 61,05% (Figura 66b). A média anual de Q_H correspondeu a aproximadamente a 46,65% do saldo de energia disponível no meio, enquanto no período seco e úmido as relações observadas foram de 45,04 e 48,08 %, respectivamente. O Sítio 3 apresentou comportamento intermediário em termos de fluxo de calor sensível e latente.

Em São Paulo, observou-se fluxo médio mensal mínimo de calor latente em junho de $0,90 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ e máximo em novembro de $2,66 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. Com relação aos fluxos de calor sensível, o mínimo ocorreu em maio, com $2,08 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ e máximo em novembro com $5,54 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ (FERREIRA, 2010). Em Miami, os valores médios diários do fluxo de calor latente e sensível observado de maio a junho foram de $4,58 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ e $6,69 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, o que corresponde a aproximadamente 33% e 49% da energia disponível no meio (GRIMMOND e OKE, 1999). As frações para o período se assemelham às observadas no Sítio 1 em Cuiabá. Biudes (2008) em estudo em área pastagem na proximidade de Cuiabá encontrou fluxo calor latente médio diário mínimo em julho com $4,50 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ e máximo em dezembro com $7,8 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. Em relação aos fluxos de calor sensível, o valor médio diário mínimo foi observado em setembro com $2,70 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ e máximo em março com $7,1 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. Em termos de média anual, verificou-se que Q_E e Q_H correspondem a 57,60% e 35,5% da energia disponível no meio. As frações avaliadas na área de

pastagem se aproximam mais das observadas no Sítio 2. Ao se consultar os dados apresentados por Maitelli (2010), constata-se que Q_E e Q_H corresponderam a aproximadamente 38,26 e 38,96% da energia disponível no meio no período de agosto e setembro, havendo equilíbrio nos fluxos de calor latente e sensível durante o experimento. No mesmo período, houve predominância dos fluxos de calor sensível (54,71%) sobre o latente (27,66%) no Sítio 1, mais central.

O ciclo anual da variação dos fluxos de calor latente e sensível nos Sítios 1, 2 e 3 acompanhou os padrões de sazonalidade da região (Figura 65 e Figura 66). Observa-se elevação dos fluxos de calor latente de setembro a janeiro e redução de fevereiro a maio. No Sítio 1, o fluxo de calor latente se manteve praticamente constante de setembro a janeiro, a partir do qual se observa ligeira redução até maio. De maio a julho, nota-se novamente que ocorre elevação nos fluxos de calor latente a taxas bem inferiores as observadas nos meses úmidos, justificado pela entrada de frentes frias úmidas na região. Exceção acontece no Sítio 3, onde as taxas de calor latente se elevaram consideravelmente em virtude da irrigação promovida de abril a outubro no campo de futebol localizado ao sul da escola onde os instrumentos foram instalados. É importante destacar que a irrigação influenciou mais os instrumentos de maio a setembro em virtude da maior frequência de ventos sul durante esse período do ano. Com relação à sazonalidade do fluxo de calor sensível, nota-se que os sítios apresentaram comportamentos bem distintos. No Sítio 1, observa-se elevação dos fluxos de setembro a dezembro, redução nos meses de janeiro e fevereiro, nova elevação de março a abril, declínio de abril a julho e elevação de agosto a setembro. No Sítio 2, nota-se declínio nos fluxos de setembro a maio, abrupta elevação em abril, declínio de maio a julho e elevação em agosto e setembro. No Sítio 3, verifica-se declínio de outubro a dezembro, elevação de janeiro a março, novo declínio de abril a setembro. A redução dos fluxos de calor sensível nos últimos meses nesse sítio se deu em virtude da irrigação do campo de futebol localizado a barlavento do sítio durante o período de seca, onde o vento predominantemente sul, trouxe contribuição de umidade para os sensores instalados a sotavento.

A sazonalidade de Q_E e Q_H observada em São Paulo difere em termos de padrão da observada nos sítios de Cuiabá. Já o padrão observado por Biudes (2008) se aproxima do padrão observado para o Sítio 2, o mais vegetado entre os sítios

estudados. Não foi possível comparar a sazonalidade dos dados de Miami e Ouagadougou visto que os estudos realizados nestes sítios ocorreram apenas durante o período de verão.

A variação diária dos valores horários médios mensais para os fluxos de calor latente e sensível podem ser visualizados na Figura 67 para o período seco e na Figura 68 para o período úmido nos Sítios 1, 2 e 3, respectivamente. Ao se analisar o comportamento no Sítio 1, observa-se que os fluxos máximos diurnos de Q_E e Q_H em média ocorreram às 12h com intensidade de $139,24 \text{ W m}^{-2}$ e $241,65 \text{ W m}^{-2}$ no período da seca e às 10h30min e 11h30min no período úmido com intensidades de $141,64 \text{ W m}^{-2}$ e $241,15 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente. Os valores médios máximos diurnos da radiação líquida (Q^*) foram observados às 12h no período seco com intensidade de $520,94 \text{ W m}^{-2}$ e às 11h30min no período úmido com intensidade de $510,22 \text{ W m}^{-2}$. Diante do exposto, nota-se que a variação de Q_E e Q_H se encontra em fase com Q^* no período seco. Por outro lado, no período úmido, Q_E se encontra adiantado (avanço de fase) em 1 hora em relação a Q^* e Q_H se encontra em fase. O valor médio diário de Q_E foi de $3,43 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no período seco e $3,87 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no úmido, com média anual de $3,65 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. O valor médio diário de Q_H foi de $5,58 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no período seco e $5,56 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no úmido, com média anual de $5,57 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. Desta forma, constata-se que no período pesquisado que houve predomínio dos fluxos de calor sensível sobre o latente.

No Sítio 2, constata-se que os fluxos máximos diurnos de Q_E e Q_H em média ocorreram às 11h30min com intensidades de $143,70 \text{ W m}^{-2}$ e $213,08 \text{ W m}^{-2}$ no período da seca e às 11h30min e 13h no período úmido com intensidades de $224,78 \text{ W m}^{-2}$ e $184,26 \text{ W m}^{-2}$. Os valores médios máximos diurnos da radiação líquida (Q^*) foram observados às 11h30min, com intensidade de $471,79 \text{ W m}^{-2}$ e $511,455 \text{ W m}^{-2}$ no período seco e úmido, respectivamente. Diante do exposto, nota-se que a variação de Q_E e Q_H se encontra em fase com Q^* no período seco. Por outro lado, no período úmido, Q_E se encontra em fase com Q^* e Q_H se encontra defasado (atraso de fase) em 1,5h em relação a Q^* . O valor médio diário de Q_E foi de $3,32 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no período seco e $5,61 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no úmido, com média anual de $4,46 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. O valor médio diário de Q_H foi de $4,64 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no período seco e $4,03 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no úmido, com média anual de $4,34 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. Verifica-se neste

sítio que no período seco houve predominância de fluxos de calor sensível sobre o latente, enquanto que no período úmido, ocorreu comportamento inverso. Observa-se que os fluxos de calor latente no Sítio 2 foram 3,30 e 44,80% superiores aos fluxos no Sítio 1 no período seco e úmido respectivamente. Com relação aos fluxos de calor sensível, constatou-se que os mesmos foram 16,70 e 27,50% inferiores aos observados no Sítio 1. A média anual de Q_E e Q_H foi 22% superior e 20% inferior às observadas no Sítio 1.

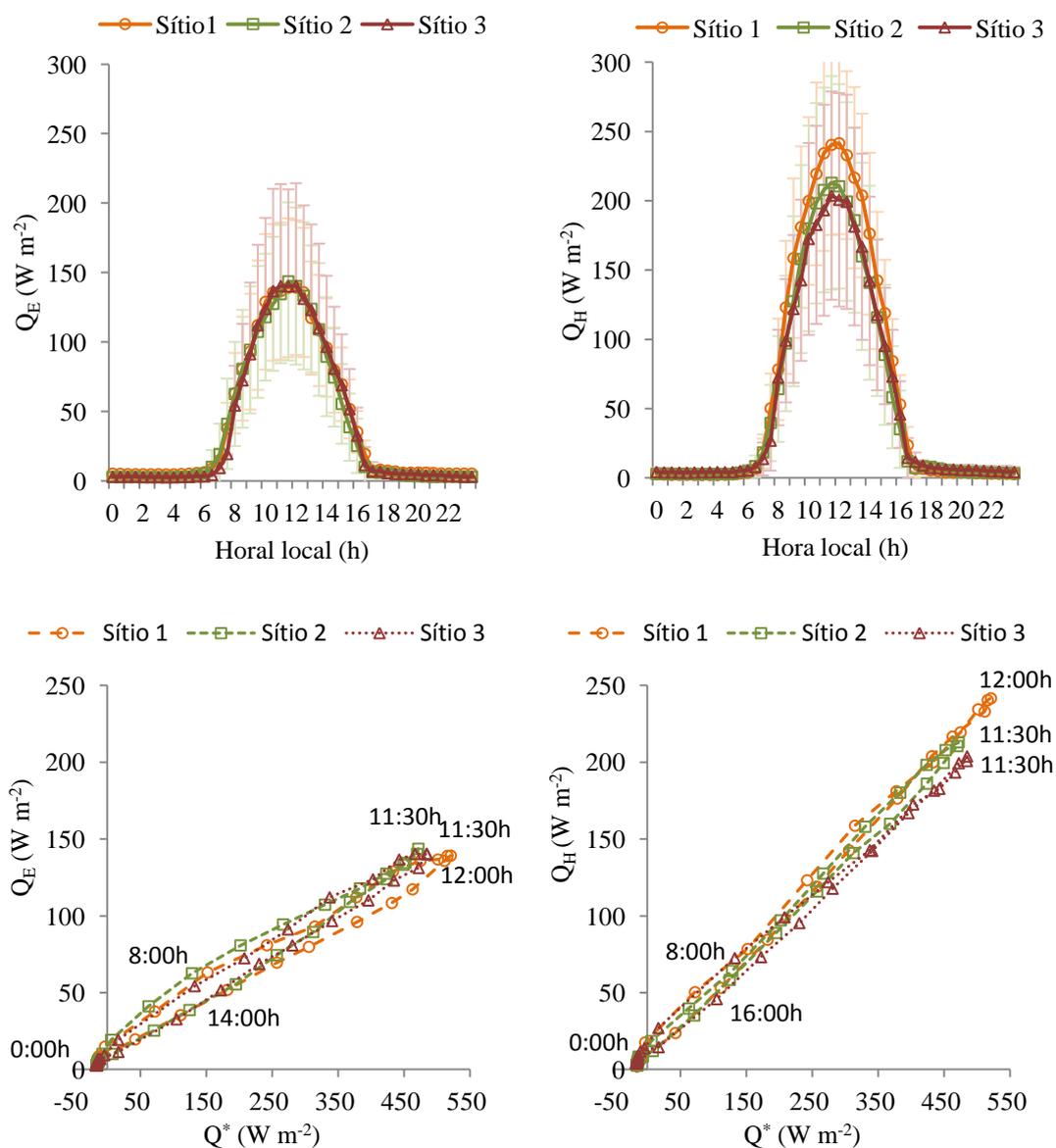


Figura 67 – Variação média diária do fluxo de calor latente (Q_E) e fluxo de calor sensível e diagrama de dispersão entre Q_E/Q_H e radiação líquida (Q^*) nos Sítios 1, 2 e 3 – período seca

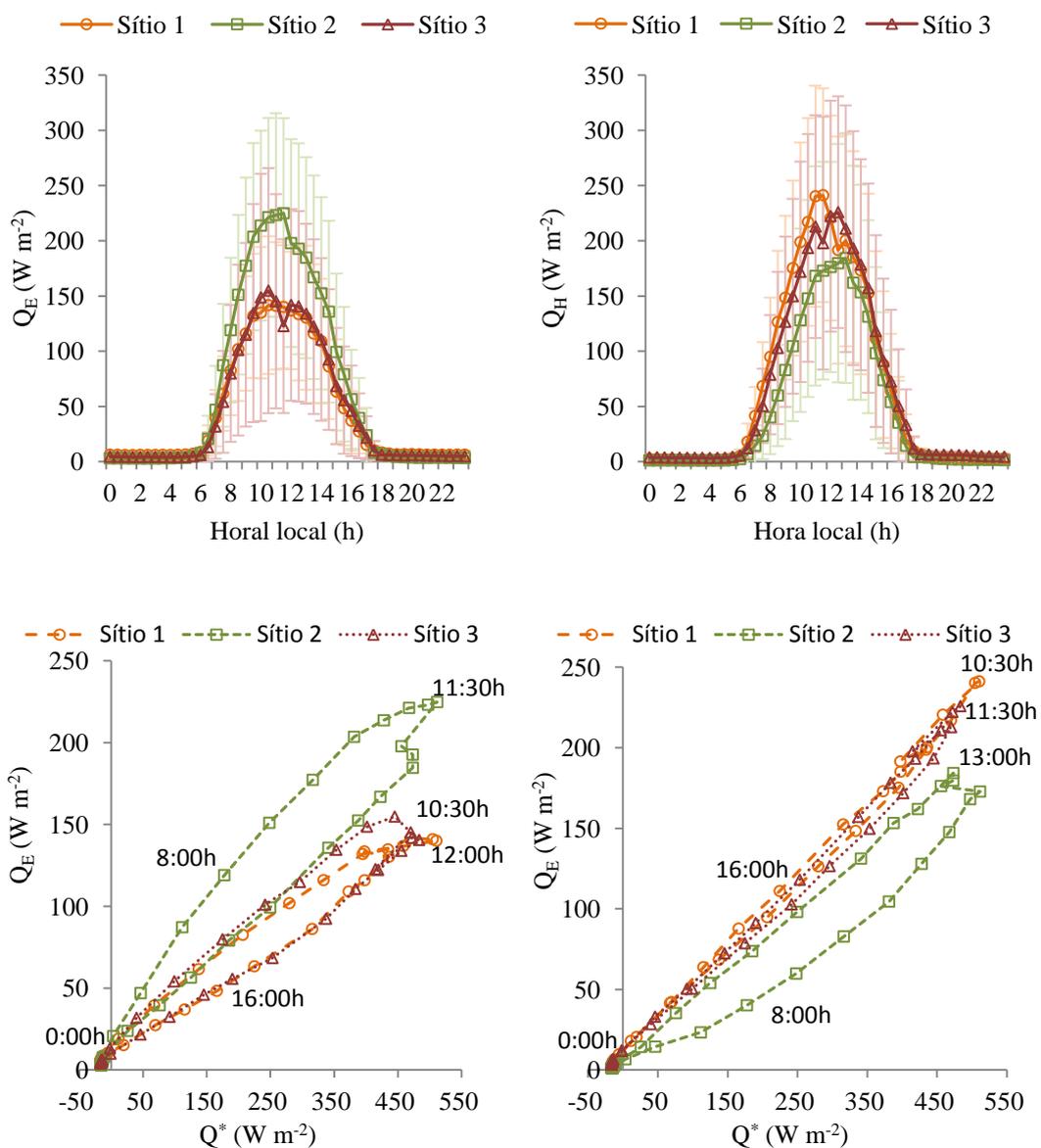


Figura 68 – Variação média diária do fluxo de calor latente (Q_E) e fluxo de calor sensível e diagrama de dispersão entre Q_E/Q_H e radiação líquida (Q^*) nos Sítios 1, 2 e 3 – período úmido

No Sítio 3 verifica-se que os fluxos máximos diurnos de Q_E e Q_H em média ocorreram às 11h30min com intensidades de $140,08 W m^{-2}$ e $203,81 W m^{-2}$ no período da seca e às 10h30min e 12h30min no período úmido com intensidades de $154,74 W m^{-2}$ e $225,75 W m^{-2}$. Os valores médios máximos diurnos da radiação líquida (Q^*) foram observados às 11h30min no período seco com intensidade de $484,77 W m^{-2}$ e às 12h30min no período úmido com intensidade de $483,27 W m^{-2}$.

Diante do exposto, nota-se que a variação de Q_E e Q_H se encontra em fase com Q^* no período seco. Por outro lado, no período úmido, Q_E se encontra adiantado (avanço de fase) em 2,0h em relação a Q^* e Q_H se encontra fase. O valor médio diário de Q_E foi de $3,52 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no período seco e $4,00 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no úmido, com média anual de $3,76 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. O valor médio diário de Q_H foi de $4,47 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no período seco e $5,54 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no úmido, com média anual de $4,96 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. Verifica-se neste sítio que tanto no período seco quanto no período úmido houve predominância de fluxos de calor sensível sobre o latente. Os fluxos de calor latente no Sítio 3 foram 2,50 e 3,5% superiores aos fluxos no Sítio 1 no período seco e úmido, respectivamente. Com relação aos fluxos de calor sensível, verificou-se que os mesmos foram 20,0 e 2,0% inferiores aos observados no Sítio 1. A média anual de Q_E e Q_H foi 3% superior e 11% inferior às observadas no Sítio 1. Com relação ao Sítio 2, os fluxos de calor latente no Sítio 3 foram 6,0% superior e 28,5% inferior no período seco e úmido, respectivamente. Já os fluxos de calor sensível foram 3,8 e 35,1% inferior aos observados no Sítio 2. A média anual de Q_E e Q_H foi 15,70% inferior e 14,26% superior às observadas no Sítio 2.

Ferreira (2010) encontrou no período diurno valor máximo de Q_E e Q_H igual a 65 W m^{-2} e 197 W m^{-2} às 14h em agosto e 67 W m^{-2} e 209 W m^{-2} também às 14h em fevereiro, período representativo das estações seca e úmida. Biudes (2008) verificou que as intensidades de Q_E e Q_H alcançaram $259,7 \text{ W m}^{-2}$ e $159,3 \text{ W m}^{-2}$ na estação seca e $319,7 \text{ W m}^{-2}$ e $234,4 \text{ W m}^{-2}$ na estação úmida na região de pastagem próxima a cidade de Cuiabá. Em Miami, os valores de Q_E e Q_H alcançaram valores máximos de aproximadamente 160 W m^{-2} e 250 W m^{-2} às 13h, enquanto em Ouagadougou eles atingiram valores de aproximadamente 50 W m^{-2} e 200 W m^{-2} , respectivamente. Como se pode constatar, a intensidade Q_E em São Paulo foram muito inferior às observadas nos Sítios 1, 2 e 3, enquanto que a intensidade Q_H se aproxima dos valores encontrados nos sítios. Os valores de Q_E determinados por Biudes (2008) são superiores aos observados na cidade por se tratar de ambiente tipicamente rural, onde naturalmente se espera elevação do fluxo de calor latente. Os valores de Q_H registrados nos sites urbanos foram superiores aos de Biudes (2008) tanto no período seco quanto no úmido. Exceção é o Sítio 2, local em que o fluxo de calor sensível no período úmido foi inferior ao observado no sítio rural. O

comportamento médio observado em Miami se aproxima do verificado em Cuiabá, e o sítio de Ouagadougou se mostrou muito árido, com baixas taxas de fluxos de Q_E .

Na Tabela 13 são apresentadas as frações de área plana vegetada e impermeabilizada de cada sítio pesquisado bem como relações entre os fluxos de calor latente e sensível estimadas nos sítios urbanos de Cuiabá, em São Paulo, em Miami e Biudes (2008) ($Q^* > 0$). Com a finalidade de compará-las com os resultados obtidos em sítios de clima temperado, as relações apresentadas na Tabela 13 foram plotadas na Figura 69 em conjunto com os dados avaliados em vários sítios experimentais investigados por Grimmond e Oke (2002) e Offerle et al. (2006). A indisponibilidade das frações de área vegetada e impermeabilizada impossibilitou que os resultados de Maitelli (2010) pudessem ser plotados na Figura 69.

Tabela 13– Fração de área plana vegetada, impermeabilizada e relações entre Q_E/Q^* , Q_H/Q_E e $Q_H/(Q^*-\Delta Q_S)$ para os Sítios 1, 2 e 3 ($Q^* > 0$).

Local	Fração vegetada (F_V)	Fração Impermeabilizada (F_I)	Q_E/Q^*	$Q_H/(Q^*-\Delta Q_S)$	Q_H/Q_E
Sítio 1	0,15	0,74	0,30	0,62	1,57
Sítio 2	0,17	0,49	0,43	0,44	0,83
Sítio 3	0,09	0,79	0,31	0,63	1,48
São Paulo	0,05	0,75	0,15	0,93	3,27
Biudes(2008)	0,95	0,05	0,57	0,30	0,62
Miami-EUA	0,23	0,53	0,27	0,61	1,55

Ao se observar a Figura 69a, nota-se que os pontos de Q_E/Q^* ficaram compreendidos acima da curva teórica estabelecida com os dados obtidos para as cidades de clima temperado. Isso significa dizer que os Sítios 1, 2 e 3 apresentaram taxas de fluxos de calor latente superiores às verificadas nos sítios com clima temperado. Por outro lado, as relações Q_H/Q_E ficaram compreendidas abaixo da curva teórica, o que indica que os fluxos de calor sensível foram proporcionalmente menores aos observados na cidade de latitudes elevadas (Figura 69b). Alguns fatores corroboram para o ocorrido, entre os quais pode-se citar: a fração de área permeável no entorno, bem como as propriedades hidráulicas do solo urbano nos sítios estudados (permeabilidade, condutividade e capacidade hidráulica). A irrigação no entorno dos sítios também pode ser uma justificativa plausível. Nota-se que as taxas de fluxos de calor sensível estão diretamente relacionadas à fração de área plana

impermeabilizada e acompanham a curva teórica estabelecida na Figura 69c. No entanto, observa-se que as frações se encontram abaixo das determinadas nas cidades de latitude elevadas. Com relação à cidade de São Paulo, nota-se que as taxas de fluxos de calor latente observadas foram muito inferiores às observadas nos sítios pesquisados, enquanto a relação Q_H/Q_E ficou compreendida acima da curva teórica estabelecida para cidades de clima temperado, o que indica que os fluxos de calor sensível foram muito superiores aos observados nas cidades de latitudes elevadas. A cidade de Miami - Flórida apresentou relações muito semelhantes às observadas nos Sítios 1 e 3. Para que curvas teóricas para cidades de clima tropical possam ser estabelecidas, existe a necessidade de realização de vários experimentos, preferencialmente em meios urbanos com características diferentes das pesquisadas neste trabalho.

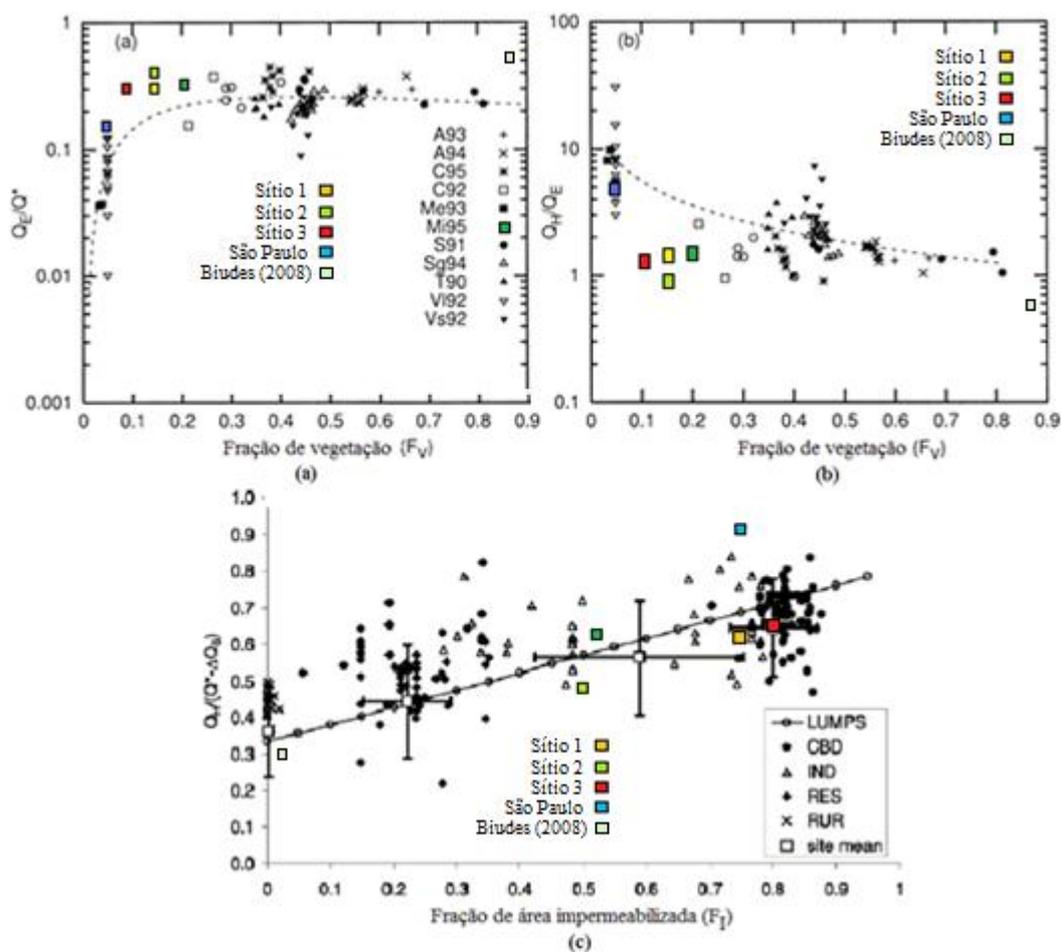


Figura 69 – Relações entre (a) Q_E/Q^* e (b) $Q_H/(Q^* - \Delta Q_s)$ com a fração de área plana vegetada (F_V) e (c) Q_H/Q_E com a fração de área plana impermeabilizada (F_I) entre os Sítios 1, 2 e 3 e de clima temperado. Dados representativos das 10 às 14h, hora local
Fonte: (a) e (b) adaptado de Grimmond e Oke (2002) e (c) de Offerle et al. (2006)

5.6.2 Comparação Interurbanas entre os Sítios

O teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) indicou que as distribuições de Q_E e Q_H nos sítios estudados não apresentam distribuição normal, o que levou a utilização do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis com a finalidade de comparar estatisticamente os valores de Q_E e Q_H avaliados nos sítios urbanos. A estatística de Kruskal-Wallis indicou em quase todas as análises que existem diferenças significativas entre os valores de Q_E e Q_H estimados para as áreas de estudo ($p < 0,05$), tanto na estação seca quanto na chuvosa. Exceção aconteceu entre os fluxos de calor latente (Q_E) entre os Sítios 1-3 e fluxos de calor sensível (Q_H) entre os Sítios 1-2 na estação seca, onde o teste indicou não haver diferenças significativas.

A diferença anual entre os fluxos turbulentos de calor latente nos sítios 1-2, 1-3 e 2-3 foi respectivamente de $-305,92 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($-0,84 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), $-36,80 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($-0,10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e $269,11 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($0,74 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Desta forma, constata-se que no entorno do Sítio 2, com maior fração de vegetação e menos impermeabilizado, houve predomínio do fluxo de calor latente em relação aos demais, com menores frações de vegetação e mais impermeabilizados. Este fato justifica as maiores umidades encontradas no entorno do Sítio 2, quando comparadas com os demais sítios estudados (Item 5.2.3). Entre os sítios menos vegetados, nota-se que no Sítio 3, mais periférico, houve preponderância do fluxo de calor latente sobre o Sítio 1, mais central, devido ao intenso processo de irrigação verificado no entorno desse sítio, principalmente nos meses de abril a outubro.

Pela análise da Figura 70a, nota-se que as diferenças entre os Sítios 1 e 2 acompanham o comportamento sazonal de chuvas na região. De outubro a abril, as diferenças entre os fluxos turbulentos de calor latente nos sítios se tornaram negativas, atingindo máxima diferença no mês de março com $-68,67 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$, mês com maior disponibilidade de água no meio em virtude da maior intensidade pluviométrica. De maio a agosto, observa-se que as diferenças se tornaram positivas, atingindo valor máximo em agosto com $35,18 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. Esse comportamento indica que no período úmido os fluxos turbulentos de calor latente no Sítio 2 foram mais intensos que no Sítio 1, e no período seco, ocorre comportamento inverso.

Ao se confrontar os Sítios 1 e 3, nota-se que de agosto a janeiro, as diferenças entre os fluxos de calor latente nos sítios se tornaram negativas, atingindo máxima

diferença no mês de setembro com $-77,81 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. De fevereiro a julho, constata-se que as diferenças se tornaram positivas, atingindo valor máximo em março com $41,62 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. No primeiro período, os fluxos turbulentos de calor latente no Sítio 3 foram mais intensos que no Sítio 1, enquanto no segundo, ocorre comportamento inverso. É possível verificar que a irrigação promovida no campo de futebol localizado ao sul da escola onde os instrumentos foram instalados, modificou o comportamento dos fluxos de calor latente principalmente nos meses de agosto a outubro. A maior intensidade de Q_E no Sítio 1 durante o período úmido pode ser atribuída a menor fração de área impermeabilizada e maior fração de área vegetada em seu entorno, se comparada ao Sítio 3.

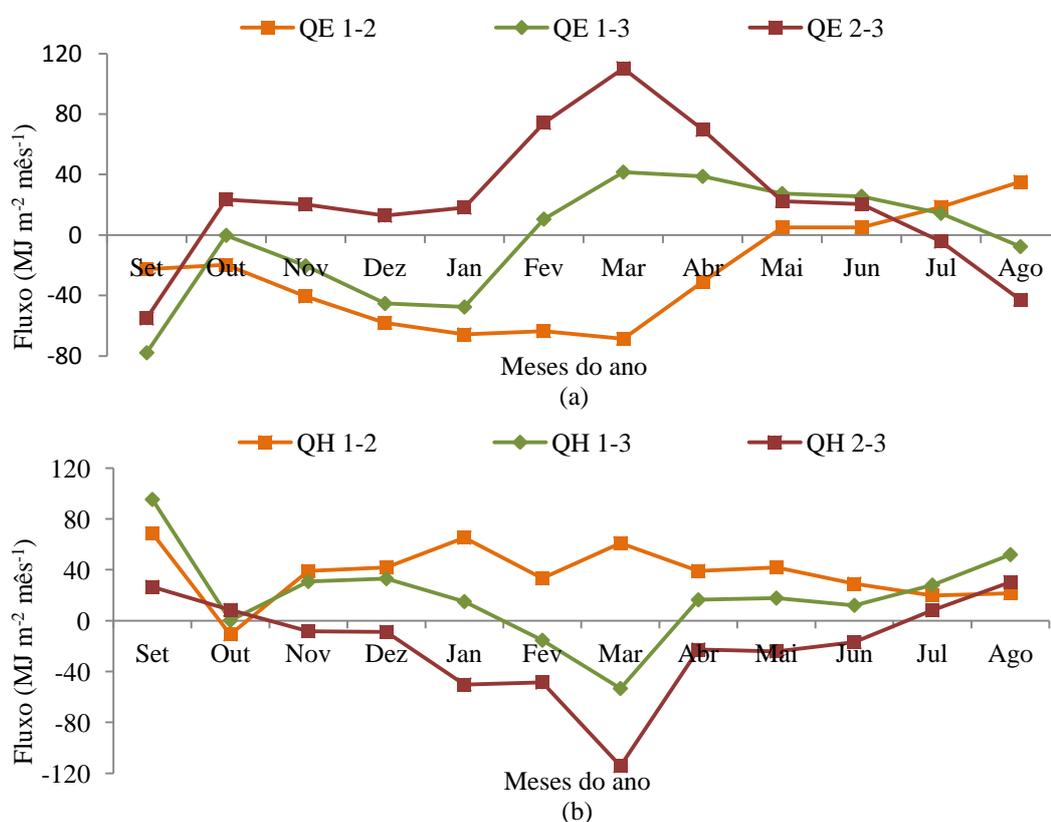


Figura 70 – Variação sazonal da diferença entre os fluxos turbulentos de (a) calor latente e (b) calor sensível no entorno dos Sítios 1, 2 e 3

As relações entre os Sítios 2 e 3 apresentaram comportamento diferente do apresentado entre os Sítios 1-2 e 1-3. Verifica-se que de outubro a junho, as diferenças entre os sítios foram positivas e atingiram valor máximo em março com $110,29 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$, mês com maior quantidade de precipitação na região. De julho a setembro, as diferenças tornaram-se negativas, atingindo valor máximo em

setembro com $-55,11 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$, resultado do efeito da irrigação promovida no Sítio 3.

A diferença anual entre os fluxos turbulentos de calor sensível nos Sítios 1-2, 1-3 e 2-3 foi de $449,89 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($1,23 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), $229,37 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($0,62 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e $-220,51 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($-0,60 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Desta forma, constata-se que no entorno do Sítio 1, mais central e com menor fração de vegetação, houve predomínio do fluxo de calor sensível em relação aos demais. Entre os sítios periféricos, constatou-se que no Sítio 3 os fluxos de calor sensível foram superiores aos observados no Sítio 2, menos periférico e mais vegetado.

Pela análise da Figura 70b, nota-se que as diferenças nos fluxos de calor sensível entre os Sítios 1 e 2 se mantiveram positivas durante quase todo o ano, com exceção no mês de outubro. A maior diferença foi encontrada no mês de setembro com $-68,76 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. Esse comportamento indica elevados fluxos de calor sensível sendo dissipado no entorno do Sítio 1, o que justifica as maiores temperaturas observadas neste sítio urbano, quando comparado com os demais.

Comportamento semelhante foi observado entre os Sítios 1 e 3, onde as diferenças entre os fluxos de calor sensível se mantiveram positivas em quase todos os meses do ano, com exceção de fevereiro e março, onde as diferenças se tornaram negativas. A maior diferença positiva foi observada no mês de setembro com $95,35 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. No entanto, é possível observar que as diferenças após o mês de abril voltam a ser positivas em virtude do processo de irrigação promovido no entorno do Sítio 3, que se iniciou neste mês. Caso a irrigação não tivesse sido promovida, o Sítio 3 teria apresentado as maiores taxas de fluxos de calor sensível que as observadas no entorno do sítio mais central de fevereiro a setembro, alterando o comportamento observado, em virtude de maior taxa de impermeabilização do solo e menor taxa de área vegetada verificada em seu entorno.

Com relação às diferenças entre os Sítios 2 e 3, verifica-se que elas se mantiveram negativas de novembro a julho, com valor máximo atingido em março com $-114,22 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$, mês com maior precipitação pluviométrica. De julho a setembro, as diferenças se tornaram positivas, com valor máximo de $30,36 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ em setembro. Isso indica que nos meses secos houve predomínio no fluxo de calor sensível no Sítio 2, provavelmente devido a menor disponibilidade de água

nesse período no entorno do Sítio 2. Outro fato que justifica esse comportamento foi a irrigação promovida no entorno do Sítio 3.

5.7 RAZÃO DE BOWEN

5.7.1 Variação Sazonal e Diária da Razão de Bowen nos Sítios 1, 2 e 3

Ao se analisar a variação sazonal da razão de Bowen no Sítio 1 (Figura 71), o mais central entre os sítios estudados, nota-se que o valor mínimo médio mensal ocorreu no mês de fevereiro (1,28) e o valor máximo em setembro (2,82). A média anual de β correspondeu a aproximadamente a 1,59, enquanto no período seco e úmido, os valores médios observados foram 1,74 e 1,48, respectivamente. Estes resultados indicam que tanto no período seco quanto no úmido houve predomínio dos fluxos verticais de calor sensível sobre os fluxos verticais de calor latente.

A variação sazonal da razão de Bowen no entorno do Sítio 2, mais vegetado e menos impermeabilizado que os demais, indica que o valor mínimo médio mensal foi Regis tradono mês de março (0,54) e o valor máximo em agosto (1,74). A média anual de β correspondeu a aproximadamente a 1,07, enquanto no período seco e úmido, os valores médios observados foram 1,42 e 0,73, respectivamente. Estes resultados indicam que no período seco houve predomínio do fluxo vertical de calor sensível sobre o fluxo vertical de calor latente, enquanto no período úmido, ocorreu comportamento inverso.

O comportamento da razão de Bowen no Sítio 3, o mais impermeabilizado e mais periférico, mostra que o valor mínimo médio mensal ocorreu no mês de setembro (0,51) e máximo no mês de março (3,0). O comportamento observado é justificado pela influencia da irrigação promovida nas proximidades deste sítio, que mascarou os resultados encontrados no período de abril a outubro. Caso a irrigação não tivesse sido promovida, ter-se-ia verificado comportamento semelhante ou até de maior intensidade do que os observados no entorno do Sítio 1, principalmente nos meses de agosto e setembro.

A média anual de β correspondeu aproximadamente a 1,52, enquanto no período seco e úmido, os valores médios observados foram 1,41 e 1,63, respectivamente. Nota-se que o período seco apresentou β inferior ao período úmido, justamente devido à irrigação promovida no entorno deste sítio urbano. Caso a irrigação não tivesse sido realizada, este sítio provavelmente teria apresentado as

maiores razões de Bowen tanto no período seco quanto no úmido em relação aos demais, ratificando as relações entre $Q_H/(Q^*-\Delta Q_s)$ e fração de área plana impermeabilizada (F_I) apresentadas por Offerle et al. (2006).

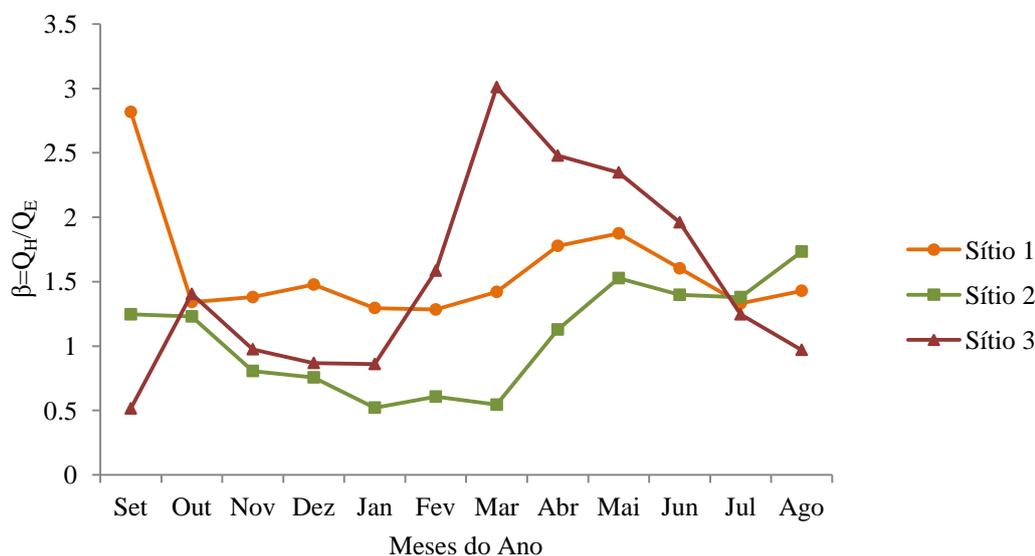


Figura 71 – Variação sazonal dos valores médios mensais da razão de Bowen nos Sítios 1,2 e 3

Em São Paulo, a razão de Bowen média mensal apresentou valor mínimo de 2,92 em setembro e máximo de 4,29 em junho e média anual foi de 3,54. Estes valores são muito superiores aos valores sazonais e médios anuais observados nos sítios urbanos de Cuiabá.

Para Miami, a intensidade média diária da razão de Bowen foi de 1,47 no período de maio a julho (GRIMMOND e OKE, 1999), valor semelhante ao observado ao sítio central de Cuiabá. É importante destacar que o sítio em Miami apresenta características morfológicas tridimensionais semelhantes às observadas nos Sítios 1 e 3, com 29% de área de telhado, 21% de área de cânions urbanos e relação área plana e tridimensionais de 1,33 (Tabela 10 para características dos Sítios 1 e 3).

Em Ouagadougou, a razão média de Bowen encontrada foi de 2,5 entre fevereiro e março, o que indica comportamento mais árido do que o observado nos Sítios 1, 2 e 3. Na pesquisa desenvolvida por Biudes (2008) em área pastagem na proximidade de Cuiabá, verificou-se que a razão de Bowen média no período seco e úmido foi respectivamente de 0,54 e 0,70, com média anual de 0,62.

A relação encontrada no período úmido no entorno do Sítio 2 foi semelhante a observada por Biudes (2008), enquanto que período seco houve divergência entre os resultados encontrados. A menor razão observada no período seco quando comparada ao período úmido se deve ao fato da irrigação promovida na pastagem durante este período. Diante dos resultados encontrados, pode-se dizer que durante o período úmido, este sítio urbano com elevada fração de área vegetada em seu entorno, apresentou comportamento semelhante ao observado em sítios rurais, enquanto que no período seco, ele se assemelha aos sítios urbanizados.

A coleta de dados de Maitelli (2010) foi realizada apenas em alguns dias dos meses de agosto e setembro, o que impede a comparação com os dados apresentados nesta parte do trabalho. Eles foram utilizados na comparação com a variação média diária dos valores de β para o período seco.

Os Sítios 1, 2 e 3 apresentaram padrões de sazonalidade semelhantes, apesar da irrigação promovida no entorno do Sítio 3. De outubro a fevereiro, observa-se a redução na razão de Bowen, enquanto de março a maio, observa-se elevação.

O primeiro período (primavera e verão) e o segundo (outono) correspondem aos meses em que se observa a elevação e redução da intensidade de chuva na região e conseqüentemente, maiores taxas de fluxos de calor latente.

De junho a julho, nota-se novamente que ocorre o declínio de β , agora em virtude do início da estação de inverno onde se observa a entrada de frentes frias úmidas na região. De agosto a outubro, período extremamente seco (com precipitação inferior a 12 mm), constata-se a elevação de β , havendo desta forma maior disponibilidade de energia para aquecer o dossel urbano.

Exceção é o Sítio 3 onde se observa redução de β devido à irrigação promovida, havendo desta forma preponderância dos fluxos de calor latente sobre o sensível no entorno deste sítio, semelhante ao observado por Biudes (2008) no período seco na pastagem.

Existe semelhança entre o comportamento verificado nos sítios urbanos e o de São Paulo, com menor e maior intensidade de β no período úmido e seco, respectivamente, apesar dos desvios em relação à média anual serem menores em São Paulo do que nos sítios pesquisados (FERREIRA, 2010). A sazonalidade dos

dados de Miami e Ouagadougou não foram avaliadas visto que os estudos realizados naqueles sítios ocorreram apenas durante o período de verão.

A variação diária dos valores horários médios mensais da razão de Bowen pode ser visualizada na Figura 72 para o período seco e na Figura 73 para o período úmido nos Sítios 1, 2 e 3, respectivamente.

Ao se analisar o comportamento da variação diária da razão de Bowen durante o período seco (Figura 72), observa-se que os máximos valores de β em média ocorreram às 13h30min, 10h30min e às 13h30min nos Sítios 1, 2 e 3 com intensidade 2,02, 1,67 e 1,76, respectivamente. Observa-se que durante o período noturno, a razão de Bowen se manteve positiva alcançando valores máximos às 18h nos Sítios 1 e 2, e às 5h no Sítio 3, com intensidades de 0,83, 1,70 e 1,58, respectivamente.

Os valores médios diurnos de β nos Sítios 1, 2 e 3 ($Q^* > 0$) foram de 1,80, 1,51 e 1,66. Isso indica que durante o período seco, os fluxos de calor sensível preponderaram sobre os fluxos de calor latente, inclusive no sítio mais vegetado. Nota-se durante o período seco que a ausência de disponibilidade de água no meio fez com que Q_H/Q_E fossem semelhantes, apesar do particionamento da energia nos sítios ter sido diferentes.

O sítio mais central foi que apresentou maior razão de Bowen, confirmando os resultados encontrados em cidades de clima temperado, onde este comportamento igualmente foi verificado. No entanto, ao se comparar os resultados encontrados para área central com os valores sugeridos na Tabela 1, verifica-se relação muito inferior às observadas nas regiões centrais de 9,8 apresenta por Piringer et al. (2002). No entanto, para cidades de menor porte como a de Miami, nos USA (GRIMMOND e OKE, 1999), e Basel, na Suíça (CHRISTEN e VOGT, 2004), com características de população e extensão territorial semelhante à cidade de Cuiabá, a razão de Bowen esteve compreendida entre 1,47 e 2,08, indicando que os resultados encontrados nos Sítios 1, 2 e 3 estão coerentes com os determinados nessas regiões.

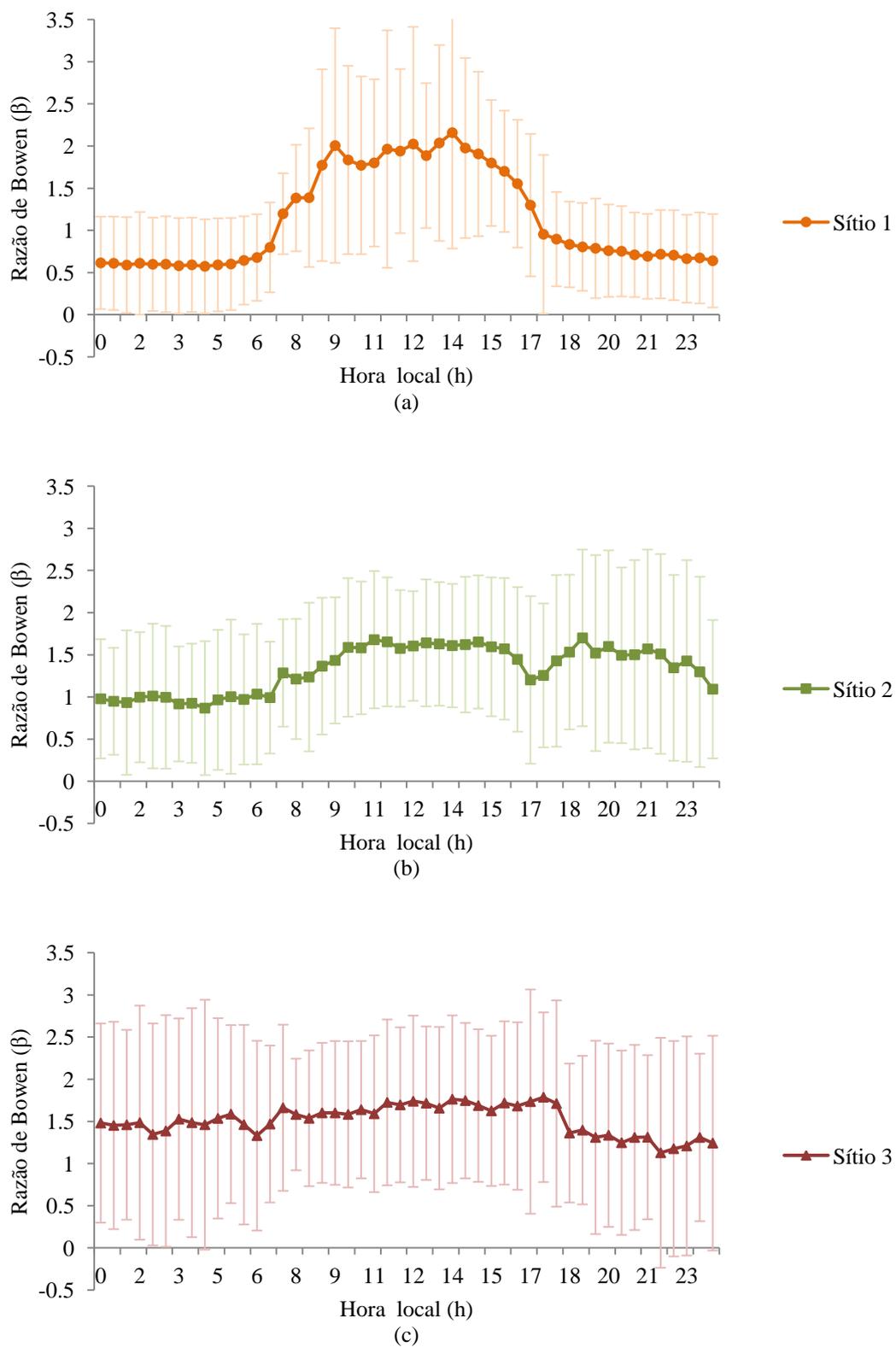


Figura 72 – Variação sazonal dos valores diários médio mensais da razão de Bowen no período seco nos Sítios 1 (a), 2 (b) e 3 (c)

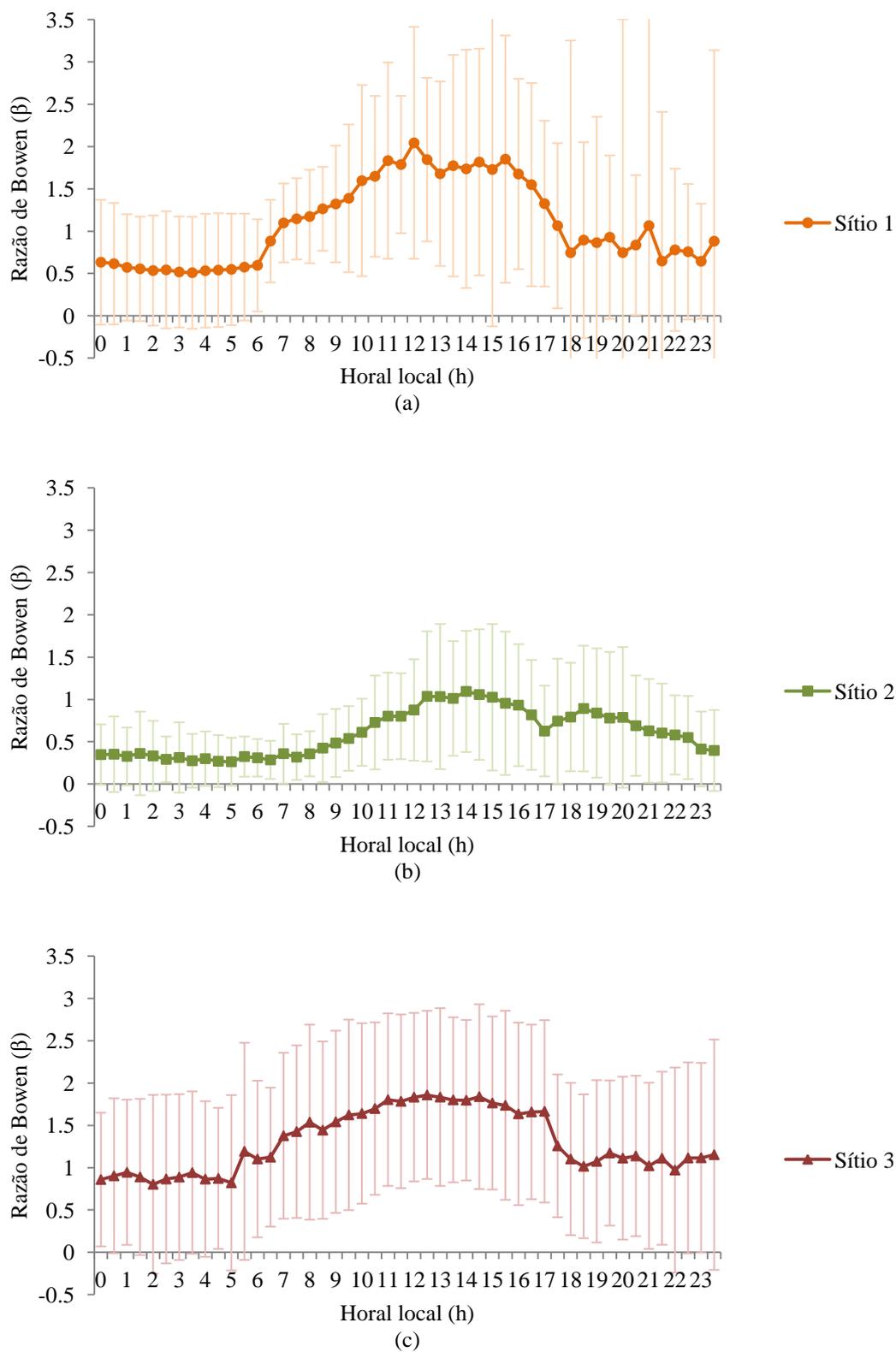


Figura 73 – Variação sazonal dos valores diários médio mensais da razão de Bowen no período úmido nos Sítios 1 (a), 2 (b) e 3 (c)

Ao se analisar o comportamento da variação diária da razão de Bowen durante o período úmido (Figura 73), observa-se que os máximos valores de β em média ocorreram às 12h, 14h e às 12h30min nos Sítios 1, 2 e 3 com intensidade 2,04, 1,09 e 1,85, respectivamente. Observa-se que durante o período noturno, a razão de Bowen se manteve positiva alcançando valores máximos às 21h no Sítio 1, às 18h30min no Sítio 2 e às 19h30min no Sítio 3, com intensidades de 1,06, 0,89 e 1,17, respectivamente.

Os valores médios diurnos de β nos Sítios 1, 2 e 3 ($Q^* > 0$) foram de 1,62, 0,75 e 1,68. Isso indica que durante o período úmido, os fluxos de calor sensível preponderaram sobre os fluxos de calor latente nos Sítios 1 e 3, enquanto no Sítio 2 houve preponderância dos fluxos de calor latente sobre o sensível. Nota-se que durante o período úmido que a disponibilidade de água no meio fez com que os sítios apresentassem diferentes valores para a razão de Bowen, resultado das diferenças morfológicas que os Sítios 1, 2 e 3 apresentam em seus entornos (Tabela 10 e 11). O sítio 3 mais periférico foi que apresentou maior razão de Bowen, seguido do sítio mais central e depois do mais vegetado, modificando o comportamento avaliado no período seco.

Em São Paulo, durante o período diurno, a razão de Bowen permaneceu relativamente constante e igual a 4, contrapondo-se ao que foi observado nos Sítios 1, 2 e 3, em que se observa grande variação ao longo do dia, tanto no período seco quanto no úmido. À noite, Ferreira (2010) destaca que a razão variou em torno de -4,8 em fevereiro (período úmido) a -6,5 em agosto (período seco). Em Cuiabá, a razão de Bowen permaneceu positiva nos três sítios estudados, indicando que os fluxos turbulentos se mantiveram da superfície para a atmosfera durante o período noturno.

Em Miami, durante o dia, a razão de Bowen média foi de 1,55. À noite, a razão permanece positiva até 21h (local), horário a partir do qual se torna negativa em virtude da inversão de sentido do fluxo de calor sensível. Em Ouagadougou, a razão de Bowen média diária não foi apresentada, o que impede que comparações possam ser realizadas. No trabalho realizado por Maitelli (2010), a autora descreve que a razão de Bowen durante o período de observação em média foram superiores a 1,0 durante o período diurno, e a noite, alcançaram valores de até -3,2. É interessante

destacar que as medições realizadas pelos autores descritos neste trabalho foram realizadas acima do dossel urbano, enquanto as realizadas neste trabalho na grande maioria dos casos esteve inserida dentro do dossel urbano, principalmente os níveis 1 e 2 de medição de temperatura e umidade. O nível 3, ora esteve dentro do dossel urbano, ora esteve acima do mesmo, conforme descrito abaixo.

O comportamento observado para razão de Bowen nos sítios estudados indica que durante o período diurno e noturno os fluxos de calor sensível e latente permaneceram positivos, o que indica que energia está sendo liberada da superfície para a atmosfera, comportamento este verificado em alguns sítios urbanos como Basel, na Suíça (CHRISTEN e VOGT, 2004).

A forma como a instrumentação foi concebida e realizada fez com que o primeiro e segundo níveis de medições de temperatura e umidade ficassem compreendidos dentro do dossel urbano, enquanto o terceiro, ora se situava dentro do dossel durante o período diurno à medida que a CLU se desenvolvia, ora se situava acima à medida que a intensidade de turbulência da CLU se reduzia devido à supressão de entrada de energia dentro do dossel urbano no período noturno. Notou-se que tanto durante o dia quanto durante a noite a diferença de temperatura e umidade entre os níveis 1-2 e 1-3 permaneceu positiva, sendo as maiores diferenças observadas durante o dia entre os níveis 1-3 e durante a noite entre os níveis 1-2. Desta forma, os fluxos de calor sensível e latente nos Sítios 1, 2 e 3 acabam sendo avaliados principalmente entre os níveis 1 (2,5 m) e 2 (3,75 m), durante o dia e noite, e excepcionalmente entre os níveis 1 (2,5 m) e 3 (5,0 m), durante o dia.

A permanência dos fluxos de calor sensível e latente positivo dentro do dossel urbano se dá em virtude da liberação do calor armazenado (ΔQ_S) durante os períodos em que não há entrada de radiação líquida no sistema urbano ($Q^* > 0$). Este comportamento resulta em aparecimento de convecção térmica durante o período noturno em virtude das regiões mais próximas as superfícies (devido ao resfriamento radioativo dos materiais que formam o dossel urbano) estarem mais aquecidas e mais úmidas que as regiões superiores do dossel urbano, o que induz turbulência, gerando uma camada de mistura durante o período noturno.

Os resultados encontrados diferem dos observados no meio rural, onde Q_H é direcionado da atmosfera para a superfície devido à inversão térmica observada

nestes ambientes durante o período noturno (BIUDES, 2008). É importante mencionar que os fluxos ascendentes e as modificações nas trocas turbulentas observadas na cidade explicam na formação do fenômeno de Ilha de Calor Urbana verificada entre o meio urbano e o rural. A Figura 74 exemplifica o sentido dos fluxos médios dentro do cânion urbano onde as observações meteorológicas foram realizadas.

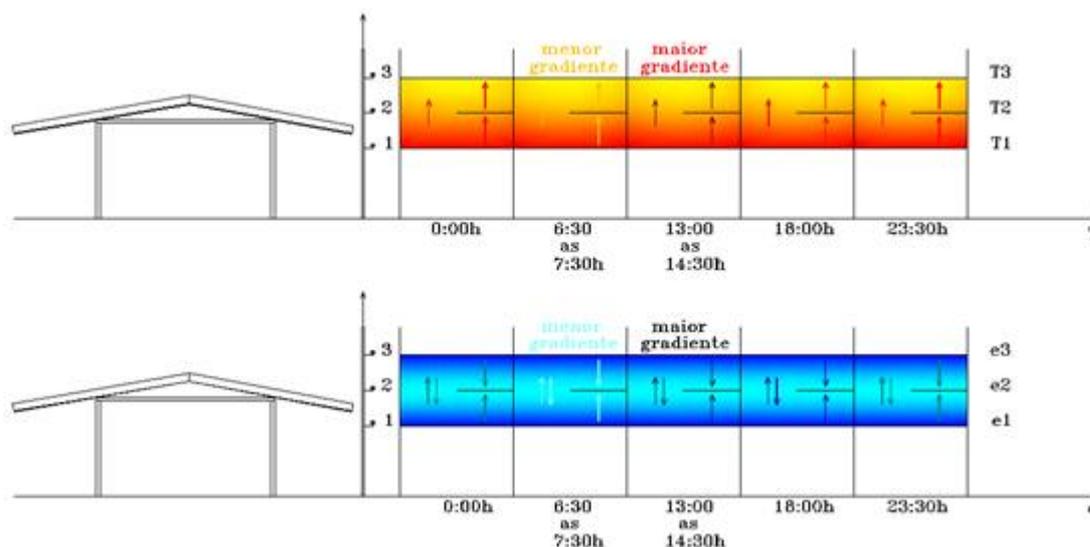


Figura 74 – Desenho esquemático do comportamento da temperatura e umidade, bem como o sentido dos fluxos dentro dos cânions urbanos dos Sítios 1 e 2. As setas indicam o sentido da menor para maior temperatura/ pressão de vapor d'água entre os níveis de medições

5.7.2 Comparação Interurbanas entre os Sítios

A razão de Bowen representa um número adimensional, por este motivo a comparação entre os sítios urbanos somente pode ser feita em termos da diferença da intensidade da razão entre Q_H/Q_E observada. A análise quantitativa dos resultados entre Q_H e Q_E pode ser verificada no Item 5.7.1.

Pela análise da Figura 75 é possível perceber que a intensidade da razão de Bowen observada no entorno do Sítio 1 foi superior ao Sítio 2 em praticamente todos os meses do ano, exceção são os meses de julho e agosto. Este comportamento está relacionado à alta taxa de impermeabilização e baixa quantidade de vegetação presente no entorno do Sítio 1, fazendo com que este apresente comportamento mais árido do que o Sítio 2, menos impermeabilizado e mais vegetado.

Em relação ao Sítio 3, observa-se que razão de Bowen no entorno do Sítio 1 foi superior de setembro a janeiro, e inferior de fevereiro a junho, sendo que nos meses de julho a agosto, a razão voltou a ser superior a observada no Sítio 3. O comportamento observado para a razão de Bowen nos últimos dois meses é explicado pela irrigação promovida no entorno do Sítio 3, o que fez com que a razão de Bowen diminuísse nesse período. É importante destacar que os Sítios 1 e 3 apresentam alta taxa de impermeabilização e baixa taxa de vegetação. A alternância de comportamento pode ser explicada pela maior ou menor precipitação ocorrida em cada sítio, bem como devido às propriedades físicas dos materiais presentes no entorno de cada sítio.

Ao se analisar o comportamento entre os Sítios 2 e 3, observa-se que a razão de Bowen foi superior no Sítio 2 entre os meses de julho a setembro, e inferior nos demais meses do ano, comportamento este justificado pela menor taxa de impermeabilização e maior taxa de vegetação no entorno do Sítio 2. As maiores taxas no entorno do Sítio 3 somente foram observadas devido a irrigação promovida no entorno deste sítio durante os meses secos. O comportamento verificado entre os Sítios 1-2 e 2-3 está relacionado à maior quantidade de vegetação no entorno do Sítio 2, fazendo com que este sítio urbano apresentasse razão de Bowen similar aos sítios rurais.

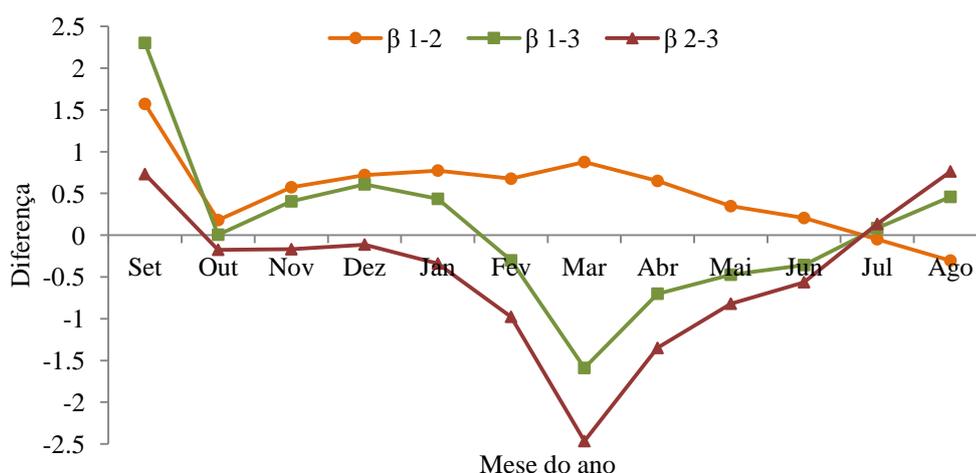


Figura 75 – Variação sazonal da diferença entre β entre os Sítios 1, 2 e 3

5.8 BALANÇO DE ENERGIA NOS SÍTIOS URBANOS 1, 2 E 3

As intensidades médias dos componentes do balanço de energia e suas respectivas frações representativas podem ser encontradas na Tabela 14. Com intuito de facilitar a compreensão do balanço de energia nos Sítios 1, 2 e 3, apresenta-se as Figuras 76 a 80 onde cursos médios diários dos componentes do balanço de energia bem, como o curso médio diário das frações, podem ser visualizados.

Pela análise da Tabela 14 é possível verificar que as parcelas dos fluxos de calor antropogênicos são as que menos contribuem no balanço de energia durante o período diurno, em média 3,1% tanto na estação seca quanto na chuvosa. No entanto, durante o período noturno, sua contribuição se eleva, chegando a representar em média 30,6% da energia disponível no meio. Desta forma, este componente apresenta baixa contribuição no balanço de energia na cidade de Cuiabá com clima tropical, enquanto que em cidades de clima temperado, devido ao elevado consumo de eletricidade e de combustíveis fósseis durante o inverno, a sua contribuição pode se elevar consideravelmente no balanço de energia, principalmente durante o período noturno. Em geral, a radiação líquida e o calor antropogênico dissipado dentro do dossel urbano representaram anualmente aproximadamente 95% e 5% do total de energia disponível no meio dentro dos dosséis dos Sítios 1, 2 e 3.

Ao se analisar o comportamento do termo ΔQ_s (Tabela 14 e Figura 76 e 77), verifica-se que existe uma grande parcela de energia sendo estocada dentro do dossel urbano tanto na estação seca quanto na chuvosa. As frações médias diurnas de $\Delta Q_s / (Q^* + Q_F)$ no balanço de energia correspondem na estação seca em porcentagem a 26, 24 e 28% da energia disponível no meio no entorno dos Sítios 1, 2 e 3, enquanto na úmida, a 23, 20 e 26%, respectivamente. O ciclo diurno $\Delta Q_s / (Q^* + Q_F)$ (Figuras 78 e 80) diverge do padrão observado na cidade de São Paulo e das cidades de clima temperado. Nota-se que desde o início da manhã há intensa contribuição de condução e convecção térmica, havendo grande quantidade de energia sendo estocada dentro do dossel e transportada para a CLU na forma de calor sensível, aquecendo e mantendo a turbulência na mesma. Durante o período vespertino, observa-se que há redução da condução e da convecção térmica dentro do dossel. Devido ao comportamento descrito, verificou-se que trajetória elíptica diurna de ΔQ_s em função de Q^* ocorre no sentido anti-horário e que praticamente não há efeito de

histerese, o que implica dizer que calor armazenado no dossel urbano se encontra em fase com o saldo de energia disponível no meio. Durante o período noturno, a fração média $\Delta Q_s / (Q^* + Q_F)$ variou de 161% a 182% nos Sítios 1, 2 e 3, o que implica dizer que este termo do balanço de energia foi o grande responsável por introduzir energia dentro do sistema urbano, o que resultou no aparecimento de convecção térmica dentro dos cânions urbanos, induzindo turbulência e gerando uma camada de mistura durante o período noturno, conforme destacado anteriormente no Item 5.7.1. Em termos gerais, durante a estação seca, o Sítio 1 foi o que apresentou maiores intensidades de calor armazenando dentro do dossel urbano seguido dos Sítios 3 e 2, enquanto que no noturno, notou-se maior intensidade no entorno do Sítio 3 do que nos Sítios 1 e 2 (Figura 76 e 77). Durante a estação úmida, tanto no período diurno quanto no noturno, as maiores intensidades foram verificadas no entorno do Sítio 3, seguidas dos Sítios 1 e 2. É importante destacar que as menores intensidade foram observadas no Sítio 2 devido a sua maior fração vegetada e permeável. Nos Sítios 1 e 3, nota-se que durante a estação da seca ΔQ_s quase se igualaram a Q_E .

Os fluxos turbulentos de calor latente foram sistematicamente inferiores aos fluxos de calor sensível, exceção aconteceu no Sítio 2 durante a estação chuvosa em virtude da maior presença de vegetação em seu entorno. As frações médias diurnas na estação seca de $Q_E / (Q^* + Q_F)$ no balanço de energia corresponderam em porcentagem a 28, 31 e 30% da energia disponível no meio no entorno dos Sítios 1, 2 e 3, enquanto na úmida, a 30, 46 e 32%, respectivamente. O ciclo diurno $Q_E / (Q^* + Q_F)$ (Figura 78 e 80) apresenta uma evolução que novamente não se assemelha ao padrão observado na cidade de São Paulo e em cidades de clima temperado. Nota-se que durante o período da manhã, as taxas de variação do fluxo de calor latente são maiores do que a observada no período vespertino em virtude da diminuição da umidade da superfície à medida que evaporação se processa no período da manhã. Devido a este comportamento, a trajetória elíptica diurna de Q_E em função de Q^* ocorre no sentido horário, sendo que na estação seca que Q_E e Q^* estão em fase (praticamente não há efeito de histerese) e na estação úmida, Q_E chegou a apresentar adiantamento de fase de até duas horas em relação a Q^* . Durante a noite, a fração média $Q_E / (Q^* + Q_F)$ no entorno do Sítio 1 chegou a representar tanto na estação seca quanto na úmida 50% da energia disponível no meio, enquanto nos Sítio 2 e 3, variou

de 30% a 46%. Os fluxos de calor latente sempre se mantiveram positivos dentro dos cânions urbanos estudados tanto no período diurno quanto no noturno. Em termos gerais, durante o período diurno e noturno na estação da seca, o Sítio 1 foi o que apresentou maiores intensidades de Q_E dentro do dossel urbano, seguido do Sítio 3 e 2. Na estação chuvosa, as maiores intensidades no período diurno foram observadas no entorno dos Sítios 2, 3 e 1, enquanto que a noite, nota-se comportamento diferente, com maiores intensidades no entorno dos Sítios 1, 3 e 2, respectivamente (Figura 76 e 77). Verifica-se que durante as estações seca e úmida, as menores e maiores intensidade de Q_E foram observadas no entorno do Sítio 2. Este comportamento pode ser justificado na seca provavelmente pela menor irrigação promovida nos jardins e quintais existentes nas residências do entorno do Sítio 2 visto que este apresenta maior quantidade de área não edificada entre os sítios urbanos. Na estação úmida, a maior presença de vegetação e área permeável elevam as taxas de evapotranspiração na região, elevando desta forma o fluxo de calor latente no entorno do sítio. Este apresentou comportamento similar a um sítio rural na estação chuvosa.

Os fluxos turbulentos de calor sensível apresentaram as maiores contribuições dentro do balanço de energia, com exceção na estação chuvosa no entorno do Sítio 2, onde houve predominância de fluxos de calor latente. As frações médias diurnas na estação seca de $Q_H / (Q^* + Q_F)$ no balanço de energia corresponderam em porcentagem a 46, 45 e 42% da energia disponível no meio no entorno dos Sítios 1, 2 e 3, enquanto na chuvosa, a 46, 33 e 45%, respectivamente. O ciclo diurno $Q_H / (Q^* + Q_F)$ (Figura 78 e 80) apresenta uma evolução que novamente não se assemelha ao padrão observado na cidade de São Paulo e das cidades de clima temperado. Nota-se que durante o período da manhã, as taxas de variação do fluxo de calor sensível são maiores do que as observadas no período vespertino, o que resultou em trajetória elíptica no sentido anti-horário, estando Q_H na estação seca em fase com Q^* (praticamente não há efeito de histerese) e na estação úmida, Q_H chegou a apresentar adiantamento de fase de até 1,5 horas em relação a Q^* no entorno do Sítio 2. Durante a noite, a fração média $Q_H / (Q^* + Q_F)$ no entorno do Sítio 1 na estação seca alcançou 31% da energia disponível no meio, enquanto na úmida, 26%. No Sítio 2, ela representou 36% e 15%, na estação seca e úmida, e no sítio 3, 42% e 39%. Os fluxos

de calor sensível sempre se mantiveram positivos dentro dos cânions urbanos tanto no período diurno quanto no noturno. Em termos gerais, durante o período diurno na estação da seca e chuvosa, o Sítio 1 foi o que apresentou maiores intensidades de Q_H dentro do dossel urbano. Por outro lado, durante o período noturno, a maiores intensidades foram observadas no entorno do Sítio 3. As menores intensidades foram observadas no entorno do Sítio 2 (Figura 76 e 77). É importante destacar que as maiores intensidades de Q_H não foram observadas no entorno do Sítio 3 mais impermeabilizado provavelmente em virtude da irrigação promovida no entorno deste sítio no período de seca. Na estação úmida, a maior presença de vegetação e área permeável no entorno do Sítio 2 diminuíram as taxas de fluxos de calor sensível no entorno deste sítio urbano.

Tabela 14 – Valores médios diários em $W m^{-2}$ para os componentes do balanço de energia e frações entre os fluxos nos sítios urbanos 1, 2 e 3 - período diurno e noturno na estação seca e úmida

Período	Estação Seca						Estação Chuvosa					
	Diurno ($Q^*>0$)			Noturno ($Q^*<0$)			Diurno ($Q^*>0$)			Noturno ($Q^*<0$)		
Sítio	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Q^*	330,9	270,2	299,9	-15,2	-15,2	-16,4	287,3	291,0	295,8	-15,5	-15,0	-15,8
Q_F	9,6	9,7	9,0	3,8	3,6	4,0	9,4	9,6	9,0	3,3	3,3	3,7
ΔQ_s	87,1	66,3	85,5	-20,8	-20,4	-22,1	67,0	60,7	79,0	-21,4	-18,7	-21,5
Q_E	93,7	86,5	91,4	5,8	3,6	3,7	89,7	137,1	97,7	6,5	3,9	4,9
Q_H	156,9	125,6	129,1	3,5	4,2	5,2	137,2	99,6	136,4	3,1	1,8	4,6
Frações												
$\Delta Q_s/(Q^*+Q_F)$	0,26	0,24	0,28	1,82	1,76	1,78	0,23	0,20	0,26	1,76	1,61	1,79
$Q_E/(Q^*+Q_F)$	0,28	0,31	0,30	-0,51	-0,31	-0,30	0,30	0,46	0,32	-0,54	-0,34	-0,41
$Q_H/(Q^*+Q_F)$	0,46	0,45	0,42	-0,31	-0,36	-0,42	0,46	0,33	0,45	-0,26	-0,15	-0,39
Q_H/Q_E	1,80	1,51	1,60	0,61	1,19	1,41	1,62	0,75	1,68	0,47	0,46	0,94
$Q_H/\Delta Q_s$	1,80	1,90	1,51	-0,17	-0,21	-0,24	2,05	1,64	1,73	-0,14	-0,10	-0,22
$(\Delta Q_s+Q_H)/Q_E$	2,60	2,22	2,35	-2,99	-4,58	-4,58	2,28	1,17	2,20	-2,80	-4,32	-3,43

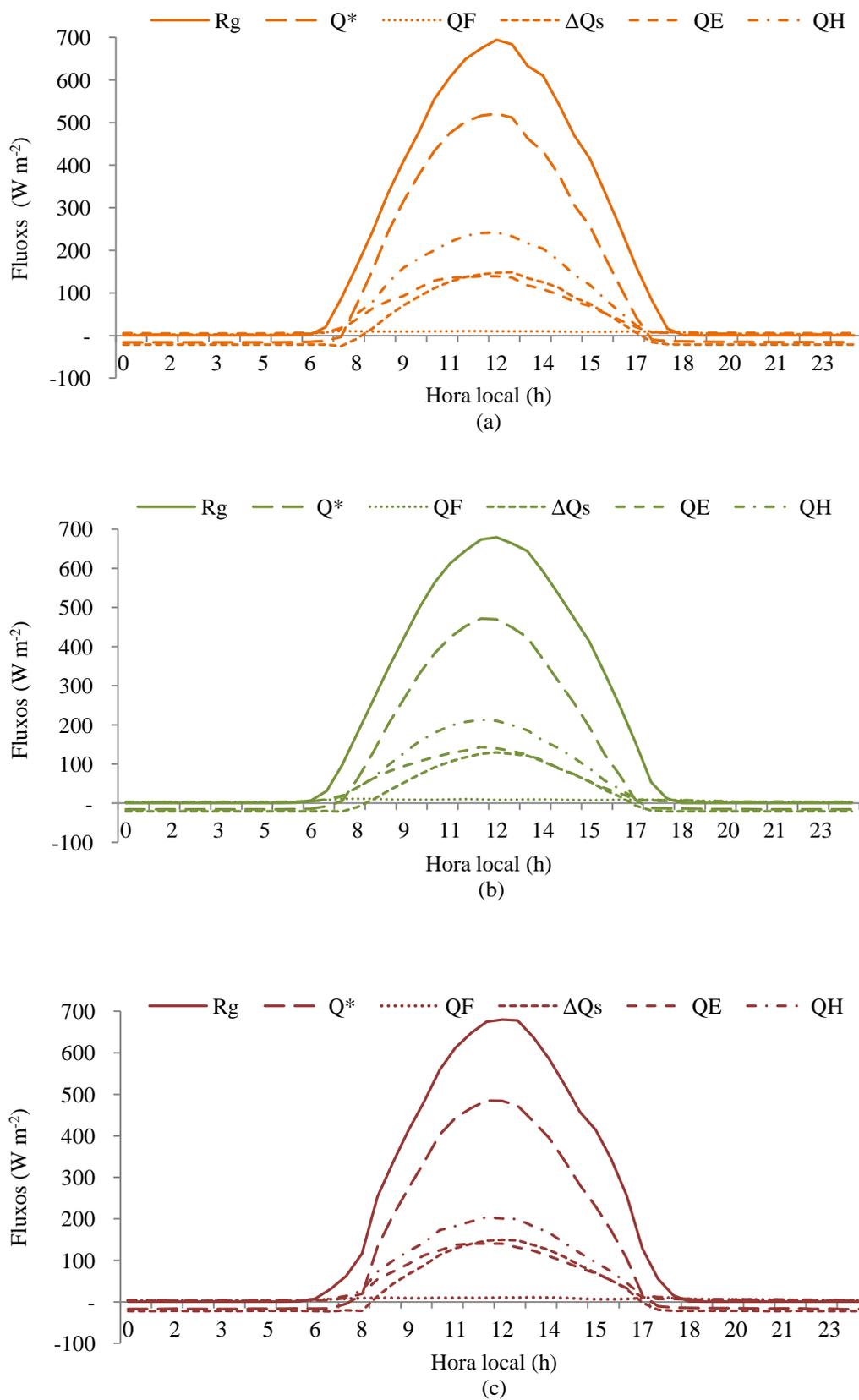


Figura 76 – Curso diário dos valores médios mensais dos componentes do balanço de energia para os Sítios 1 (a) , 2 (b) e 3 (c) no período seco

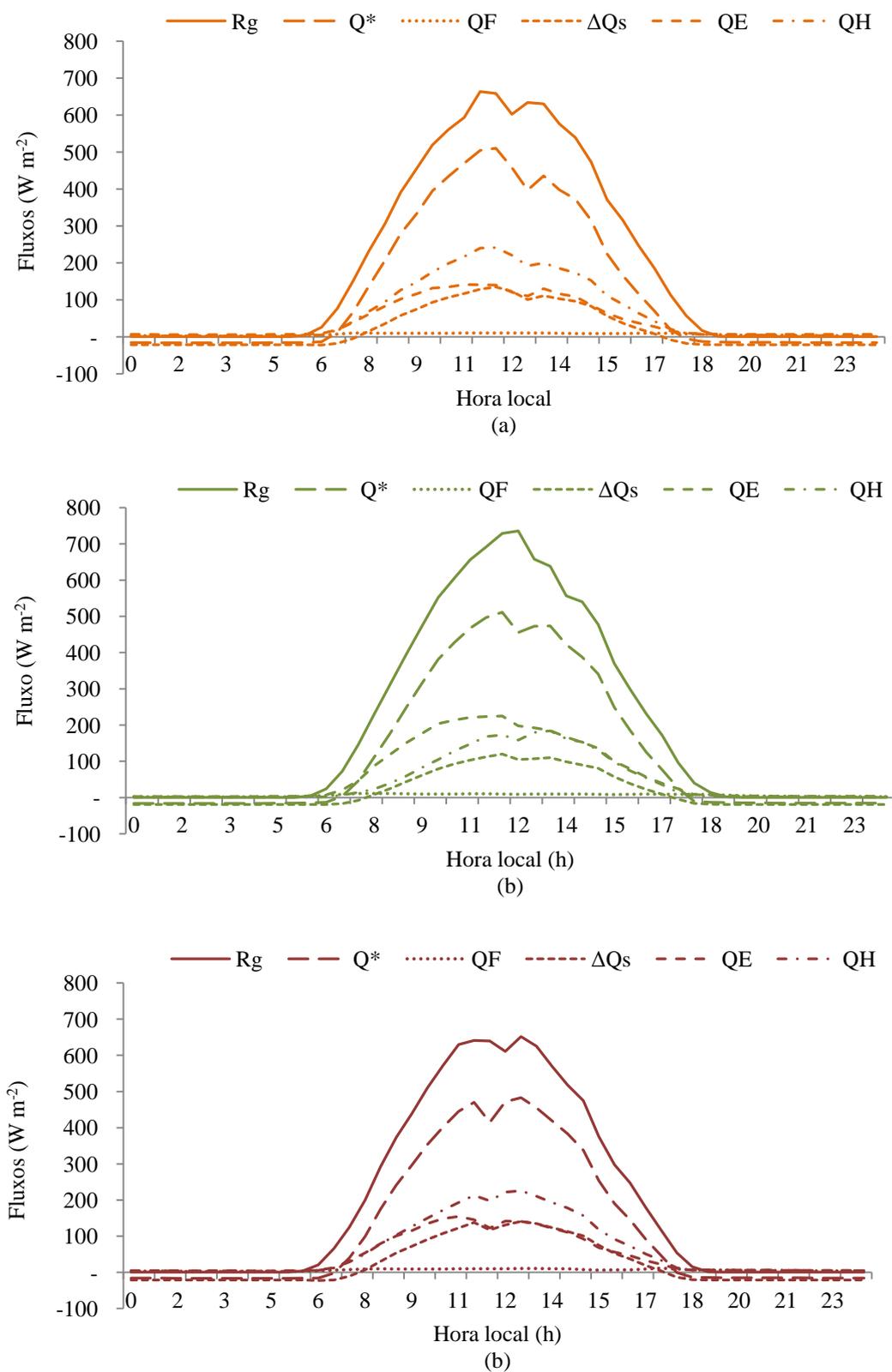


Figura 77 – Curso diário dos valores médios mensais dos componentes do balanço de energia para os Sítios 1 (a) , 2 (b) e 3 (c) no período úmido

A fração Q_H/Q_E (razão de Bowen) expressa a relação entre o fluxo de calor sensível e latente. Como se pode observar na Tabela 14 e Figuras 79 e 81, durante a estação seca no período diurno as intensidades foram superiores a 1,0 e as maiores médias foram observadas nos Sítios 1, 3 e 2, indicando que durante esta época do ano os fluxos de calor sensível preponderam sobre os de calor latente. Durante a estação úmida, mesmo havendo maior disponibilidade de água, as frações nos Sítios 1 e 3 continuaram superiores a 1,0, apesar das intensidades terem se reduzido em relação ao período seco. O Sítio 2 foi o único que apresentou fração inferior a 1,0 devido a maior presença de vegetação e maior área permeável no seu entorno, apresentando comportamento semelhante a um sítio rural. Durante o período noturno, durante a estação seca, observa-se que as frações se mantiveram positivas, visto que os fluxos de calor sensível e latente se mantiveram positivos durante este período. As maiores intensidades diurnas da razão de Bowen foram verificadas no entorno do Sítio 1, 3 e 2, tanto na estação seca, e 3, 1 e 2, na úmida.

A fração $Q_H/\Delta Q_s$ representa a relação entre o fluxo de calor sensível por convecção térmica e por condução térmica (calor armazenado dentro do dossel urbano). Durante o dia, Q_H e ΔQ_s são gerados principalmente a partir de Q^* e no período noturno, o fluxo de calor sensível por convecção térmica (Q_H) e latente (Q_E), devido a supressão da radiação solar, são alimentados pela dissipação do fluxo de calor sensível armazenado dentro do dossel urbano (ΔQ_s). Como se pode observar na Tabela 14 e Figuras 79 e 81, durante a estação seca e úmida no período diurno os fluxos turbulentos de calor sensível foram superiores aos fluxos condutivos de calor sensível armazenado dentro do dossel urbano no Sítio 1 e 3. Exceção ocorre no entorno do Sítio 2, onde se observa na estação chuvosa, redução das frações de Q_H em relação a ΔQ_s . Durante o período noturno, ΔQ_s é o agente responsável por fornecer energia para aquecer o ar dentro do dossel urbano e promover a evaporação nesses ambientes, sendo que as frações nesse período variaram desde -0,10 a -0,24 durante a estação seca e úmida. Em termos quantitativos, as maiores frações foram observadas no entorno do Sítio 1, seguido dos Sítios 3 e 2.

A análise de fração $(\Delta Q_s + Q_H)/Q_E$ (Tabela 14 e Figuras 79 e 81) indica que os fluxos calor sensível por condução e convecção são maiores que os fluxos de calor latente tanto no período diurno quanto no noturno, na estação seca e chuvosa.

Conforme destaca Ferreira (2010), durante a noite a remoção de calor armazenado compensa as perdas de radiação líquida, e no caso dos Sítios 1, 2 e 3, mantém a tanto a turbulência quanto a evaporação durante todo o período noturno. No período diurno, as maiores frações foram observadas nos sítios mais urbanizados (1 e 3) e as menores no sítio mais vegetado (2) e a noite, nos Sítio 2, 3 e 1.

As frações avaliadas para o balanço de energia dos Sítios 1 e 3 se assemelham às frações observadas para a cidade de Miami, Florida, USA (Clima Aw). Por outro lado, as observações realizadas em Ouagadougou, Burkina Faso (BSh), indicaram que Q_H preponderou sobre os demais termos do balanço de energia, fazendo com que frações divergissem dos valores observados em Cuiabá. As frações avaliadas através dos dados apresentados por Maitelli (2010) para o balanço de energia nos meses de agosto e setembro de 1993 indicaram certo equilíbrio entre os fluxos de calor sensível e latente na região. Pela análise da fração vegetada existente no entorno do sítio estudado pela autora e pelos resultados encontrados neste trabalho, de fato se esperava que a razão de Bowen fosse inferior às encontradas para os Sítios 1 e 3.

As medições realizadas na pastagem durante a estação chuvosa no trabalho de Biudes (2008) indicaram frações semelhantes às observadas no Sítio 2, com diferença que no sítio urbano houve maior quantidade de energia estocada no dossel. As semelhanças encontradas entre os sítios permitem concluir que a vegetação existente Sítio 2 foi capaz de modificar o balanço de energia no dossel urbano principalmente devido ao processo de evapotranspiração. Este resultado ratifica a importância da vegetação como agente regulador dos microclimas, em especial os urbanos, visto que ela é capaz de influenciar a umidade e a temperatura do ar nestes ambientes (Item 5.2.3), além de corroborar para o sombreamento das superfícies, reduzindo as temperaturas superficiais dentro do dossel urbano.

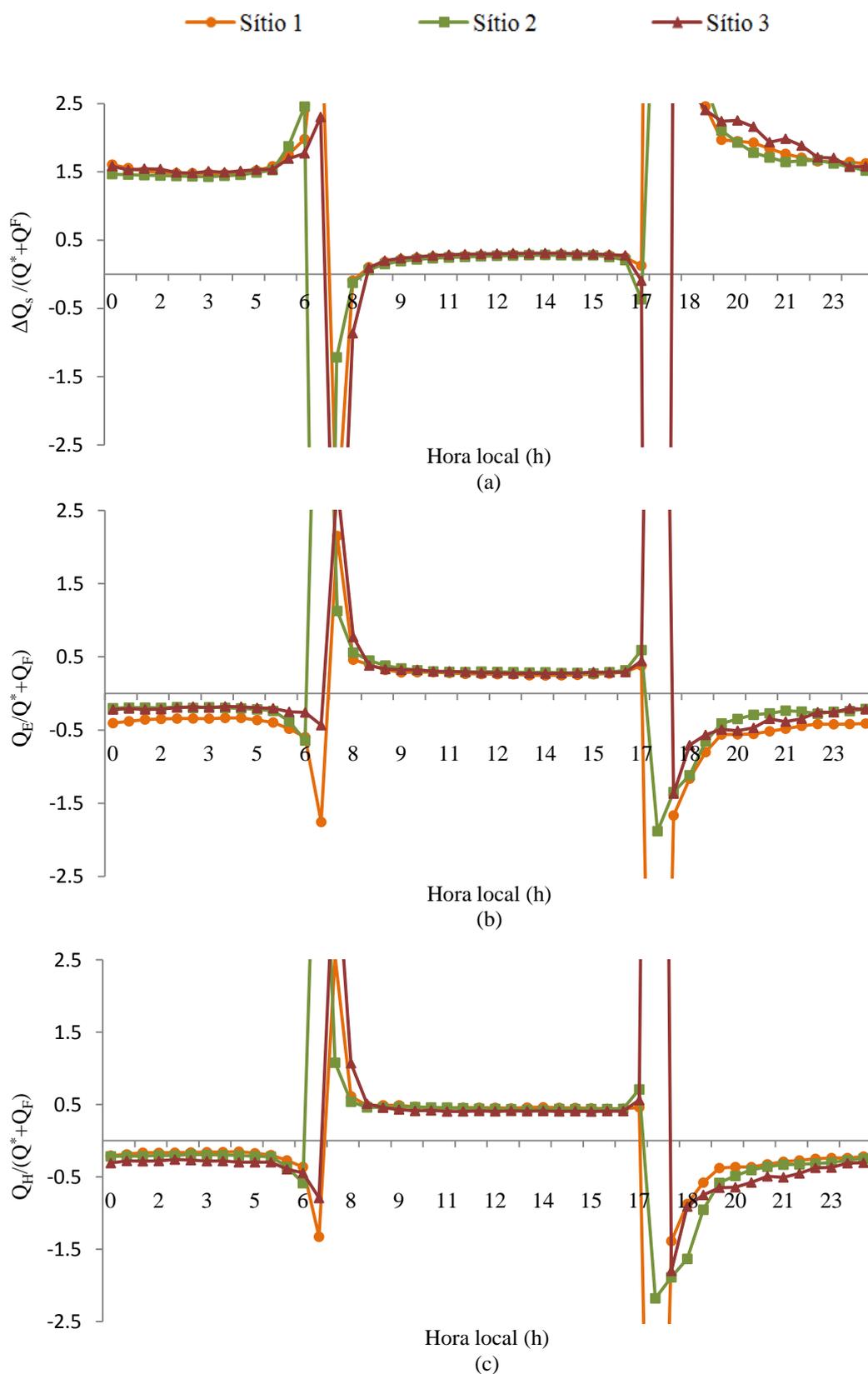


Figura 78 – Variação média diária de (a) $\Delta Q_s / (Q^* + Q_F)$, (b) $Q_E / (Q^* + Q_F)$ e (c) $Q_H / (Q^* + Q_F)$ nos Sítios 1, 2 e 3 - estação seca.

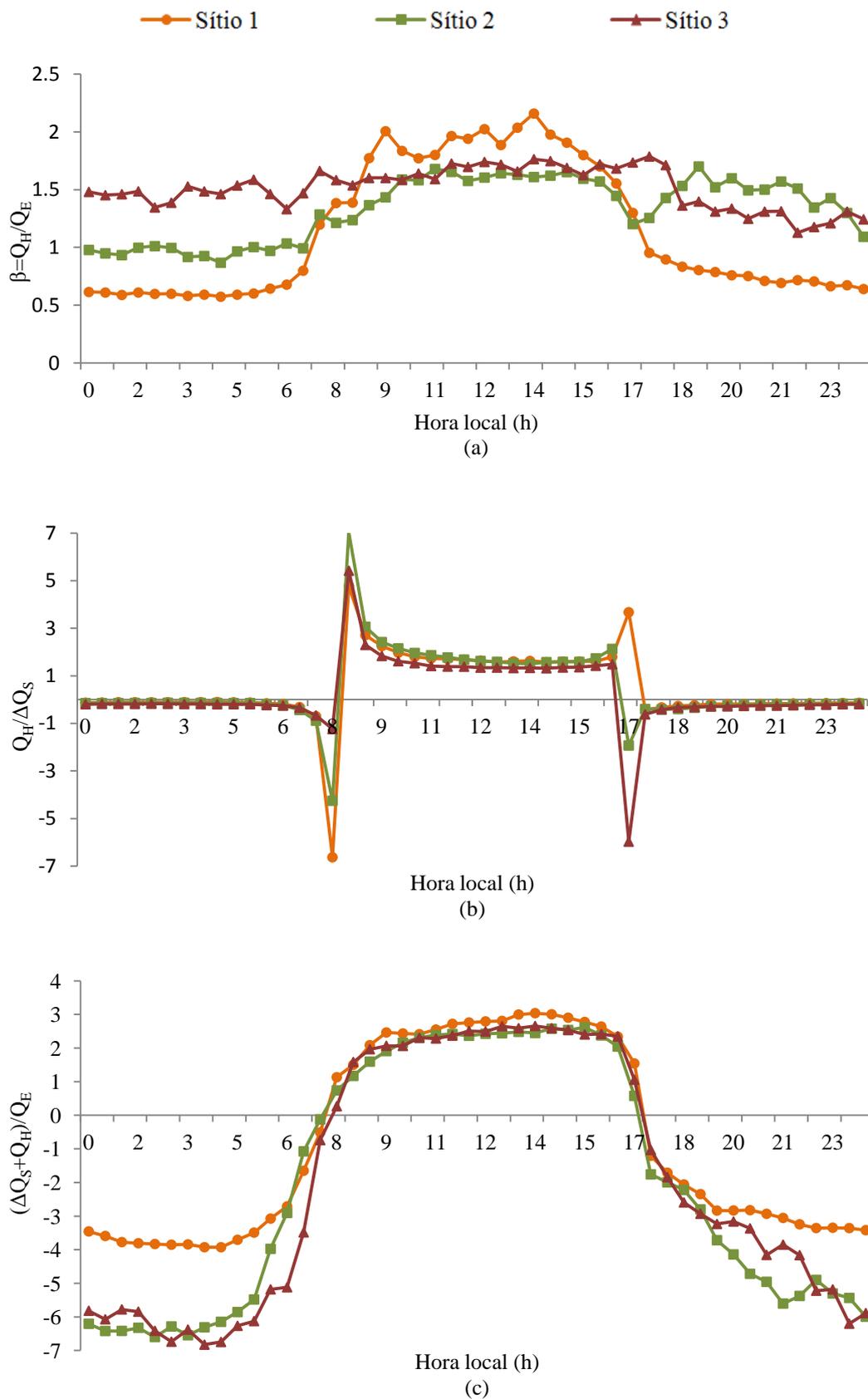


Figura 79 – Variação média diária de (a) Q_H / Q_E , (b) $Q_H / \Delta Q_s$ e (c) $(\Delta Q_s + Q_H) / Q_E$ nos Sítios 1, 2 e 3 - estação seca

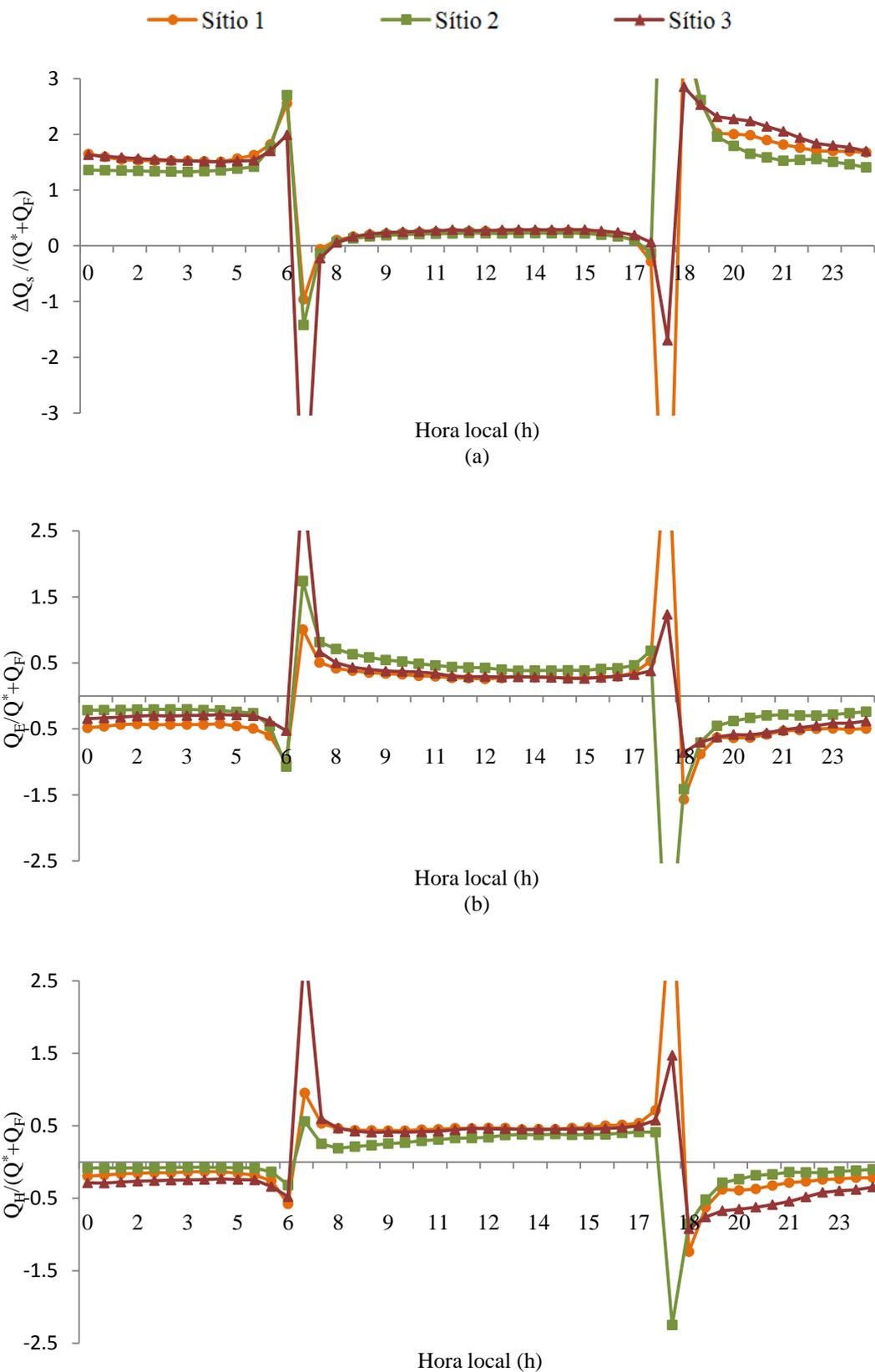


Figura 80 – Variação média diária de (a) $\Delta Q_s / (Q^* + Q_F)$, (b) $Q_E / (Q^* + Q_F)$ e (c) $Q_H / (Q^* + Q_F)$ nos Sítios 1, 2 e 3 - estação úmida

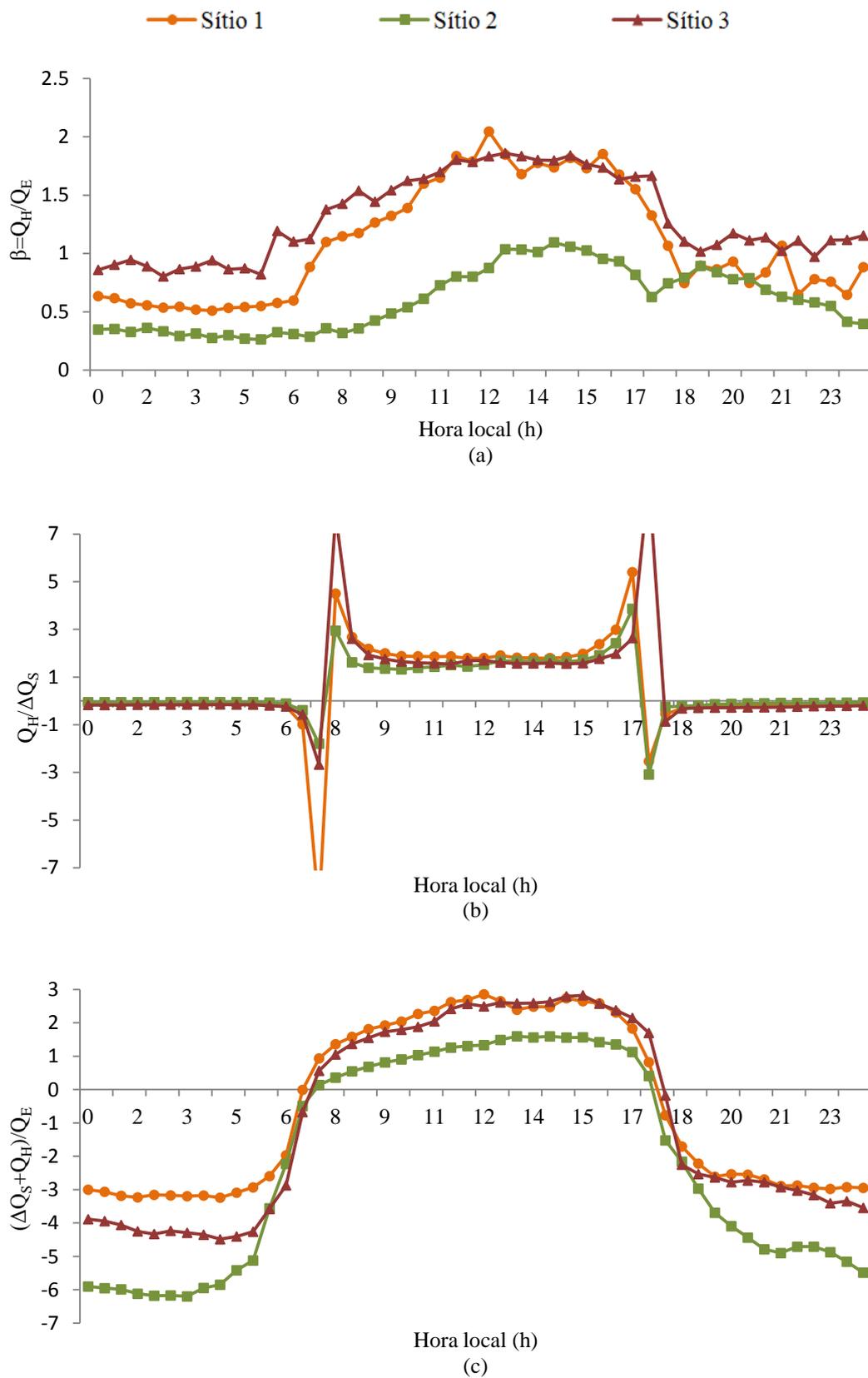


Figura 81 – Variação média diária (a) Q_H/Q_E , (b) $Q_H/\Delta Q_s$ e (c) $(\Delta Q_s + Q_H)/Q_E$ nos Sítios 1, 2 e 3 - estação úmida

5.8.1 Comentários Finais

A morfológica dos entornos indicou que os sítios urbanos 1 e 3 apresentaram comportamentos semelhantes, apesar de não serem iguais, enquanto o Sítio 2 se diferenciou dos demais. Os Sítios 1 e 3, com elevada fração construída e altas taxas de superfícies ativas dentro do dossel urbano ($A_C/A_T = 74,15\%$ e $A_{plana}/A_S = 1,33$; $A_C/A_T = 79,23\%$ e $A_{plana}/A_S = 1,31$) foram classificados na zona climática urbana 3 (UCZ 3), com elevado desenvolvimento urbano e média densidade urbana, enquanto o Sítio 2 com menor fração de área construída e taxas de superfícies ativas dentro do dossel urbano ($A_C/A_T = 48,86\%$ e $A_{plana}/A_S = 1,14$), na zona Climática 5, com médio desenvolvimento urbano e baixa densidade urbana.

Os sítios escolares se mostraram diferentes entre si, apesar de serem escolas estaduais implantadas com o mesmo partido arquitetônico. As diferenças encontradas estão relacionadas principalmente a maior presença de vegetação e menor taxa de impermeabilização do solo no Sítio 2, a maior taxa de impermeabilização do solo no Sítio 3 e o menor taxa de vegetação no Sítio 1. As maior rugosidade superficial foi verificada no Sítio 2, seguido dos Sítios 1 e 3. Como apresentando, as diferentes características morfológicas do entorno dos sítios urbanos estudados influenciaram o seu comportamento microclimático, modificando a temperatura, a umidade e a velocidade do ar, bem como as taxas de calor armazenado dentro do dossel urbano, a energia disponível no meio e os fluxos de calor sensível e latente.

A análise microclimática realizada indicou que a precipitação pluviométrica no período apresentou sazonalidade característica da região, com período de chuvas compreendido entre meses de outubro-abril e período de estiagem entre os meses de maio-setembro. A precipitação anual observada de 1042,9 mm foi 22,30% inferior média histórica anual de 1342,3 mm, avaliada entre os períodos de 1961 a 1990 (Normais Climatológicas), sendo, portanto o período estudado mais seco que a média histórica, o que de certa forma influenciou as variáveis meteorológicas pesquisadas durante o período.

Com relação à variação sazonal da radiação solar incidente, verificou-se que os sítios apresentaram padrões sazonais muito semelhantes. Como esperado, não houve diferenças estatísticas entre as observações registradas nos sítios estudados, sendo que as diferenças encontradas entre os valores médios diários e mensais de R_g

podem ser atribuídas ao fator nebulosidade, à orientação solar de cada sítio urbano, bem como a presença de diferentes tipos e portes da vegetação existentes dentro de cada sítio, que obstruíam a entrada de radiação nos locais de mediação da radiação, principalmente no início da manhã e no final da tarde. O estudo das normais climatológicas não apresenta dados médios mensais e nem anuais de R_g , o que impediu que comparações pudessem ser realizadas com os dados medidos nos sítios pesquisados.

Com relação à variável temperatura e umidade relativa do ar, observou-se que elas apresentaram variação sazonal típica. A análise estatística indicou que existe diferenças entre os sítios urbanos que podem ser atribuídas às diferentes características morfológicas verificada dentro e no entorno de cada sítio, bem como ao seu posicionamento dentro da cidade. O Sítio 1 se caracterizou por apresentar maior média de temperatura e menor média de umidade, justificado por situar-se em região mais central da cidade, local onde a ilha de calor urbana se manifestam com maior intensidade. O Sítio 2 apresentou temperatura intermediária entre o mais central e o mais periférico, acompanhando o desenvolvimento da ICU na cidade. A sua umidade média anual foi superior a registrada nos Sítios 1 e 3 em virtude da maior quantidade de vegetação e permeabilidade existente tanto no entorno quanto nas suas imediações. Estas características morfológicas influenciaram o balanço de energia deste sítio, fazendo com que o mesmo na estação chuvosa se comportasse de forma similar a um sítio rural. O Sítio 3 situado mais periféricamente foi o apresentou menor média anual de temperatura e umidade do ar ligeiramente inferior a do Sítio 2. A elevação da umidade neste sítio observada durante a estação seca se deve a irrigação promovida em seu entorno, principalmente nos meses de julho, agosto e setembro, meses em que os sensores mais estiveram sobre a influência da irrigação devido à predominância de ventos do sul na região. Caso a irrigação não tivesse sido realizada, a temperatura e umidade teriam se elevado e diminuído respectivamente no entorno deste sítio, o que poderia ter corroborado para que este sítio periférico apresentasse condições mais críticas que o sítio localizado na região central da cidade (1). A hipótese levantada se baseia no estudo de temperatura superficial por imagens de satélite realizado na cidade Cuiabá que demonstrou que as T_s no entorno do Sítio 3 foram superiores as verificadas nos Sítios 1 e 2. A irrigação

também impediu que fosse possível estabelecer correlações entre as frações de área impermeabilizada e vegetada quantificadas na análise morfológica com a temperatura e umidade do ar avaliadas nos sítios urbanos pesquisados.

Em geral, os valores médios mensais de temperatura e umidade do ar avaliados nos sítios se mantiveram acima e abaixo das médias históricas avaliadas para o período de 1961 a 1990, onde se conclui que o período em análise foi mais quente e menos úmido que aquele determinado pelas normas climatológicas. Atribui-se às diferenças observadas em parte ao posicionamento e as características entre a estação convencional do INMET e as estações meteorológicas instaladas em cada sítio, mas também ao intenso processo de urbanização pelo qual a cidade de Cuiabá passou nos últimos 20 anos. Nota-se que as constantes queimadas observadas no período de seca na região também têm influenciado de forma significativa a temperatura e umidade do ar na cidade de Cuiabá, principalmente nos meses de agosto e setembro. Em virtude do atual posicionamento da estação convencional do INMET, recomenda-se a instalação de uma estação meteorológica com fins específicos para avaliação do microclima urbano da cidade de Cuiabá. Ela deverá ser instalada em região central da cidade, a uma altura superior ao nível médio do dossel urbano (pelo menos 1,5 a altura média dos edifícios e obstruções no seu entorno), em local que apresente características de ocupação do solo semelhantes às preponderantes na região central da cidade.

A análise estatística dos dados de velocidade do ar indicou que existem diferenças significativas entre os sítios urbanos estudados, que podem ser atribuídas às características morfológicas de cada sítio, em especial a rugosidade superficial. O Sítio 3 se caracterizou por apresentar maior média de velocidade do ar, seguido dos Sítios 1 e 2. Atribui-se este comportamento a presença dos edifícios e da arborização existente dentro dos sítios pesquisados, sendo os mesmos responsáveis pela elevação da rugosidade superficial, fazendo com que o Sítio 2 fosse o mais rugoso, e os Sítios 3 e 1, os menos rugosos, conforme avaliado nas características morfológicas dos sítios pesquisados.

Com relação à direção dos ventos predominantes, a maior frequência relativa da direção dos ventos nos sítios na estação chuvosa foi a norte (N), e na estação da seca, Sul (S). Destaca-se que entre os meses de setembro, outubro e abril houve

alternância da direção do vento nos sítios, ora predominando norte ora sul, respectivamente. Outro aspecto importante a ser destacado é que a média anual de calmaria registrada nos sítios menos rugosos foram inferiores a 8,0% dos registros anuais, percentagem bem inferior à observada nas estações convencionais do INMET. Os dados médios mensais de velocidade do ar nos sítios urbanos apresentaram variação sazonal e intensidades diferentes das Normais Climatologias, com provável explicação atribuída à menor periodicidade das coletas de dados realizadas nas estações convencionais do INMET (realizadas nos horários de 12, 18 e 24 UTC) que pode ter introduzido um padrão de comportamento nos dados (um viés) diferente daquele realmente acontece na região em estudo. O comportamento observado indica a necessidade de aprofundamento de pesquisas com intuito de confirmar os resultados avaliados.

Estatisticamente não houve diferença significativa entre o fluxo de calor antropogênicos estimados nos sítios pesquisados, sendo este termo o que menos contribuiu no balanço de energia durante o período diurno, em média 3,1% da energia disponível no meio tanto na estação seca quanto na chuvosa. No entanto, durante o período noturno, sua contribuição se elevou, chegando a representar em média 30,6%, sendo, portanto este termo juntamente com a energia armazenada dentro do dossel urbano responsável por introduzir energia e turbulência dentro dos cânions urbanos durante este período.

O combustível consumido pelos veículos (Q_{FV}) é a principal fonte de dissipação de energia no meio, representando em média nos sítios estudados 72,2% dos fluxos de calor antropogênicos dissipados no meio (Q_F). Desta forma, em países de clima sub (tropical) Q_{FV} é a principal fonte de dissipação de energia dentro do dossel urbano, diferentemente do que acontece em países de clima temperado, onde as fontes estacionárias preponderam principalmente no inverno devido à necessidade de aquecimento dos edifícios.

As fontes estacionárias (Q_{FS}) foram as responsáveis pela segunda maior fonte de dissipação de energia no meio, em média 18,3% de Q_F , enquanto energia liberada pelas fontes metabólicas (Q_{FM}) pelas menores contribuições, apenas 9,5% de Q_F . As oscilações mensais observadas para Q_F durante o ano estão associadas à economia local da cidade de Cuiabá, bem como ao clima da região, visto que as menores

dissipações no entorno dos sítios foram verificadas nas estações de outono-inverno e as maiores nas estações de primavera-verão. O Sítio 3 (mais periférico) foi o que apresentou maior dissipação de calor antropogênico, seguido do Sítio 1 (mais central) e 2 (com posição intermediária). A maior dissipação observada no entorno do Sítio 3 se deu em virtude do maior fluxo de veículos e maior densidade populacional, principalmente no período noturno.

A análise estatística do componente ΔQ_s indicou que existem diferenças significativas entre as intensidades avaliadas em cada sítio pesquisado, havendo grande parcela de energia sendo estocada dentro do dossel urbano tanto na estação seca quanto na chuvosa. Em média ΔQ_s correspondeu durante o dia na estação seca e chuvosa a 26 e 23% da energia disponível no meio no entorno dos sítios estudados. Durante o ciclo noturno, ΔQ_s variou de 161 a 182% nos sítios da energia disponível no meio, o que implica dizer que este termo do balanço de energia foi o grande responsável por introduzir energia dentro do sistema urbano durante o período noturno.

Notou-se que existe certo padrão de sazonalidade em ΔQ_s , com redução na taxa de energia armazenada dentro do dossel urbano no período úmido e elevação durante o período seco. Durante a estação de inverno, verificou-se que há redução na energia armazenada dentro do dossel urbano em virtude da entrada de frentes frias na região. Percebe-se que existe relação entre a variação sazonal de ΔQ_s com o ciclo anual do saldo de radiação nos sítios pesquisados, apesar de ela não ser direta, em virtude do efeito de histerese observado entre a energia que entra (Q^*) e a que é armazenada dentro do dossel urbano (ΔQ_s). Alguns fatores influenciam no processo de armazenamento da energia como características físicas dos materiais presentes no entorno dos sítios, a cobertura de céu, a umidade e as características do solo. Foi possível observar que a trajetória diurna elíptica de ΔQ_s em função de Q^* acontece no sentido anti-horário e que praticamente não existe o efeito de histerese, estando desta forma o calor armazenado no dossel urbano em fase com o saldo de energia disponível no meio. Este comportamento diverge dos observados nas cidades de clima temperado visto que nestes locais foram observadas trajetórias no sentido horário e que o ΔQ_s atinge o valor máximo antes de Q^* (em média 1h).

Ficou demonstrado que os sítios com maiores frações de áreas impermeabilizadas e menores frações de áreas vegetadas (3 e 1) foram responsáveis por maior armazenamento de energia dentro do dossel urbano do que aqueles com menor fração de área impermeabilizada e maior fração vegetada (2). Os estudos do efeito de histerese observado, bem como as relações entre o calor armazenado no dossel e as taxas de área plana impermeabilizada e vegetada precisam ser aprofundados através de outras campanhas em virtude da divergência observada em relação ao estudo realizado em São Paulo e devido à escassez de dados para regiões de clima tropical.

As radiações líquidas disponíveis no meio nos sítios estudados estatisticamente se diferenciaram entre si, apesar de apresentar padrões de sazonalidade muito semelhantes e se relacionarem de forma direta com o ciclo anual da radiação solar incidente (R_g). Constou-se que a variação diária de Q^* ora se encontrava em fase com R_g ora se encontrava adiantado em 0,5h em relação a R_g . Em termos anuais, o Sítio 1 foi o que apresentou maior energia disponível no meio, seguido dos Sítios 3 e 2.

A análise comparativa entre os sítios indicou que houve variação sazonal da radiação líquida disponível no meio entre os sítios que basicamente podem ser atribuídas às diferenças na transmissividade e emissividade efetiva da atmosfera (devido a passagem de nuvem pelas regiões), nas propriedades térmicas do dossel urbano e na emissividade e albedo efetivo da superfície. Com relação ao albedo, acredita-se que a variação sazonal nos seus valores devido à presença da vegetação existente nas proximidades dos locais das medições tenha influenciado de forma significativa o balanço de energia dentro dos cânions urbanos.

As observações dos fluxos turbulentos de calor latente e sensível indicaram que no entorno dos Sítios 1 e 3 houve predomínio dos fluxos verticais turbulentos de calor sensível sobre os fluxos de calor latente tanto na estação seca quanto na chuvosa, enquanto do Sítio 2 na estação chuvosa, observou-se comportamento inverso. Com algumas exceções, as análises estatísticas indicaram que existem diferenças significativas entre os fluxos turbulentos estimados no entorno dos sítios pesquisados (Anexo A). As frações médias diurnas na estação seca e chuvosa de $Q_E / (Q^* + Q_F)$ no balanço de energia corresponderam em média a 30% e 36% da

energia disponível no meio no entorno dos sítios estudados, respectivamente. Os maiores valores foram observados no entorno do Sítio 1, na estação da seca. Durante a noite, a fração média $Q_E / (Q^* + Q_F)$ tanto na estação seca variou de 30 a 51% da energia disponível no meio, enquanto na chuvosa, de 34 a 54%. Por outro lado, as frações médias diurnas na estação seca de $Q_H / (Q^* + Q_F)$ no balanço de energia variaram de 42 a 46%, da energia disponível no meio no entorno dos sítios estudados, enquanto na chuvosa, a 33 e 46%. Durante a noite, a fração média $Q_H / (Q^* + Q_F)$ no entorno do sítios na estação seca variou de 31 a 41% da energia disponível no meio, enquanto na chuvosa, de 15 a 39%. Os menores valores foram observado no entorno do Sítio 2, na estação chuvosa.

Tanto os fluxos de calor latente quanto o de calor sensível sempre se mantiveram positivos dentro dos cânions urbanos tanto no período diurno quanto no noturno, resultado da convecção térmica gerada dentro dos cânions urbanos devido à liberação da energia armazenada dentro do dossel (ΔQ_s), que induziu turbulência e gerou uma camada de mistura durante o período noturno, direcionando os fluxos para fora do dossel. A trajetória elíptica diurna de Q_E em função de Q^* ocorre no sentido horário, sendo que na estação seca que Q_E e Q^* estiveram praticamente em fase (não há efeito de histerese) e na estação chuvosa, Q_E chegou a apresentar adiantamento de fase de até duas horas em relação a Q^* . Por outro lado, observou-se trajetória elíptica diurna no sentido anti-horário entre Q_H e Q^* , estando Q_H na estação seca em fase com Q^* (praticamente não há efeito de histerese) e na estação chuvosa, Q_H chegou a apresentar adiantamento de fase de até 1,5 horas em relação a Q^* no entorno do Sítio 2. A evolução diurna observada para Q_E e Q_H não se assemelha ao padrão observado na cidade de São Paulo e em cidades de clima temperado, onde se observa que Q_E e Q_H apresentam defasagem (avanço de fase) de cerca de 1 hora em relação à evolução diurna da radiação líquida.

Os pontos médios anuais estabelecidos para Q_E/Q^* , Q_H/Q_E e $Q_H/(Q^* - \Delta Q_s)$ e plotados nas curvas teóricas estabelecidas com os dados obtidos para as cidades de clima temperado, indicaram que as taxas de fluxos de calor latente foram superior as verificadas nos sítios com clima temperado, que os fluxos de calor sensível foram proporcionalmente menores que aos observados na cidade de latitudes elevadas e que as taxas de fluxos de calor sensível estão diretamente relacionadas à fração de área

plana impermeabilizada. Para que curvas teóricas para cidades de clima tropical possam ser estabelecidas, existe a necessidade de realização de vários experimentos, preferencialmente em meios urbanos com características diferentes dos pesquisados.

Os sítios apresentaram padrões de sazonalidade semelhantes com diminuição da razão de Bowen de outubro a fevereiro e elevação de março a maio, coincidindo desta forma com a elevação e redução da intensidade de chuvas na região. De junho a julho observou-se declínio de β em virtude do início da estação de inverno onde se observa a entrada de frentes frias úmidas na região. De agosto a outubro, período extremamente seco (com precipitação inferior a 12 mm), constata-se a elevação de β devido a maior disponibilidade de energia para aquecer o dossel urbano. Exceção aconteceu no entorno do Sítio 3, onde se observou redução de β devido a irrigação promovida no campo de futebol em suas imediações. Durante a estação seca no período diurno as intensidades foram superiores a 1,0 e as maiores médias foram observadas no entorno dos Sítios 1, 3 e 2, indicando que durante esta época do ano os fluxos de calor sensível preponderaram sobre os fluxos de calor latente. Durante a estação chuvosa, mesmo havendo maior disponibilidade de água, as frações nos Sítios 1 e 3 continuaram superiores a 1,0, apesar das intensidades terem se reduzido em relação ao período seco. O Sítio 2 foi o único que apresentou fração inferior a 1,0 devido a maior presença de vegetação e maior área permeável no seu entorno, apresentando comportamento semelhante a um sítio rural. Os valores médios diurnos ($Q^* > 0$) de β determinados para a estação seca foram 1,80, 1,51 e 1,66 nos Sítios 1, 2 e 3, respectivamente, e 1,62, 0,75 e 1,68, na estação úmida.

6. CONCLUSÕES

O principal objetivo desta pesquisa foi avaliar temporalmente o balanço de energia de três ambientes urbanos localizados em posições distintas da cidade. Para tal fim, a avaliação do calor antropogênico dissipado no meio foi realizado pelo Método do Inventário, o calor armazenado no dossel urbano pelo Modelo Objetivo de Histerese (OHM) e os fluxos de calor sensível e latente pelo Método da Razão de Bowen.

Os sítios urbanos foram selecionados na cidade, de forma que se pudesse obter ambientes com diferentes características morfológicas no seu entorno. Com vistas a minimizar a influencia do local de coleta de dados nas observações realizadas, selecionou-se três escolas públicas com características construtivas semelhantes (mesmo partido arquitetônico), de tal forma que as diferenças que pudessem ser encontradas entre os sítios urbanos estudados pudesse ser atribuída ao seu entorno imediato. Trabalhou-se com Modelo de Área de Contribuição (“Footprint”) Estático, admitindo que um raio de 500m de influência no entorno dos sítios pudesse representar adequadamente o calor armazenado dentro do dossel urbano, bem como a contribuição dos fluxos turbulentos de calor sensível e latente.

Ao se analisar e comparar os resultados do balanço de energia para os sítios urbanos estudados, é possível sintetizar os principais efeitos ocasionados pela modificação do uso do solo no entorno das áreas pesquisadas:

a) o fluxo de calor antropogênico (Q_F) dissipado dentro do dossel urbano pela ação antrópica tem pouca contribuição na energia disponível no meio durante o dia, no entanto, durante a noite, devido à supressão da radiação solar direta, sua contribuição chega representar 1/3 da energia disponível;

b) devido à maior quantidade de superfícies ativas, o fluxo de calor armazenado dentro do dossel urbano é superior ao fluxo de calor armazenado no solo em ambientes rurais durante o dia, sendo os fluxos de calor sensível por convecção térmica (Q_H) e latente (Q_E) são alimentados pela dissipação do fluxo de calor sensível armazenado dentro do dossel urbano (ΔQ_s) durante o período noturno;

c) encontrou-se relação não linear crescente e decrescente entre os fluxos de calor armazenados dentro do dossel urbano e as frações de área plana impermeável e vegetada nos sítios pesquisados, indicando a necessidade de que

sejam estabelecidos critérios de valores máximos e mínimos para estas frações com intuito de evitar grande estocagem de energia dentro dos ambientes urbanos; Notou-se que existe relação entre ΔQ_s com a fração de superfícies ativas existentes no entorno dos sítios, o que indica que o coeficiente de aproveitamento dentro dos mesmos deve ser controlado com intuito de evitar grande estocagem de energia;

d) as radiações líquidas disponíveis no meio nos sítios estudados apresentaram padrões de sazonalidade muito semelhantes e se relacionaram de forma direta com o ciclo anual da radiação solar incidente (R_g); Constatou-se que a variação diária de Q^* ora se encontrava em fase com R_g ora se encontrava adiantado em 0,5h em relação a R_g ; Em termos anuais, o Sítio 1 foi o que apresentou maior energia disponível no meio, seguido dos Sítios 3 e 2, respectivamente; Em termos estacionais, durante o período úmido houve mais disponibilidade de energia no Sítio 2, mais vegetado e menos impermeabilizado, do que nos Sítios 1 e 3, menos vegetados e mais impermeabilizados; durante o período seco, observou-se comportamento inverso;

e) constatou-se que fluxo de calor armazenado dentro do dossel urbano (ΔQ_s) se encontra praticamente em fase com o pico da radiação líquida no meio (Q^*); O mesmo comportamento se observa para o pico nos fluxos de calor sensível (Q_H) nos sítios mais urbanizados (1 e 3), tanto na estação seca quanto na chuvosa; Comportamento semelhante se verificou para o pico dos fluxos de calor latente (Q_E) nos sítios mais urbanizados (1 e 3) durante o período da seca; Por outro lado, durante a estação chuvosa, Q_E se encontram adiantado (avanço de fase) em até duas horas em relação ao pico da radiação líquida (Q^*); Estes comportamentos divergem dos observado nos países de clima temperado visto que nestes ΔQ_s apresentam avanço de fase em até uma hora e Q_H e Q_E se encontram defasados (atraso de fase) em até uma hora em relação ciclo de radiação líquida;

f) observou-se grande redução do fluxo de calor latente (Q_E) em virtude da reduzida área permeável e baixa quantidade de área vegetada; Constatou-se que a maior quantidade de vegetação existente em um dos sítios urbanos pesquisado foi responsável por elevar as taxas de fluxos de calor latente em seu entorno, o que demonstra a potencialidade da vegetação em melhorar as condições termo-

higrométricas dos ambientes; Este comportamento ratifica a importância de estabelecer critérios mínimos para as frações vegetadas nos ambientes urbanos;

g) na maioria dos sítios pesquisados, houve maior dissipação de energia na forma de fluxo de calor sensível (Q_H), principalmente naqueles com maior fração impermeabilizada e menor fração vegetada, novamente justificando a necessidade de estabelecimento de critérios máximos e mínimos para estas frações;

h) os fluxos de calor sensível e latente permaneceram positivos durante todo o período noturno dentro dos cânions urbanos resultado da liberação da energia armazenada dentro do dossel urbano (ΔQ_s), o que induziu turbulência e gerou uma camada de mistura durante esse período, direcionando os fluxos para fora do dossel; Esse comportamento é resultado das características térmicas (condutividade, capacidade e admitância térmica) dos materiais presentes no entorno dos sítios pesquisados, bem como da umidade e características físicas do solo (permeabilidade, condutividade e capacidade hidráulica), o que demonstra a necessidade de se pesquisar materiais alternativos que retenham menor quantidade de energia durante o dia e dissipem de forma mais rápida a mesma durante a noite.

Os resultados encontrados nesta pesquisa justificam a escolha do tema proposto na tese, visto que foram observados comportamentos que diferem dos estabelecidos para meios urbanos inseridos em cidades de clima temperado, o que demonstra a necessidade de aprofundamento de pesquisas sobre este tema nas cidades de clima tropicais. Ficou demonstrado que o adensamento urbano e a supressão da vegetação nestes ambientes urbanos foram capazes de modificar o comportamento termo-higrométrico, bem como os componentes do balanço de energia, o que indica a necessidade de estabelecer critérios máximos e mínimos para a fração de área impermeabilizada e vegetada dentro dos sítios urbanos. Os resultados encontrados sobre os microclimas urbanos nesta tese constituem importante subsídios para o planejamento e gestão das cidades, pois podem vir a auxiliar no estabelecimento de critérios e recomendações que devam ser seguidos no desenvolvimento de futuros projetos urbanísticos, podendo ser ainda incorporados ao plano diretor das cidades com vistas a auxiliar a tomada de decisão daqueles que diretamente lidam com a qualidade de vida da população.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como a investigação dos fluxos turbulentos de calor latente e sensível foi realizada através do modelo de área de contribuição (“Footprint”) estático, sugere-se a utilização do modelo dinâmico com objetivo de melhorar a estimativa desses fluxos. Para tanto, os sensores devem ser instalados acima da camada do dossel urbano e o perfil de velocidade do ar deve ser estimado com pelo menos três anemômetros para que a velocidade de fricção (u^*) possa ser determinada visto que este é utilizado para estimar a área de contribuição elíptica dos fluxos turbulentos.

Outro estudo importante poderia ser feito a partir da implantação de uma estação meteorológica em local com uso e ocupação do solo com características semelhantes às preponderantes na região central da cidade com vistas a avaliar a representatividade das medições realizadas na estação convencional do INMET.

Como a variação sazonal do saldo de radiação líquida no entorno dos sítios não ficou bem esclarecida, recomenda-se que as próximas investigações sejam complementada com medições de radiação solar incidente e refletida, bem como através de medições de radiação de onda longa emitida pela atmosfera e pela superfície, de forma que o albedo efetivo possa ser avaliado, bem como a transmissividade e emissividade efetiva da atmosfera. Desta forma, será possível evidenciar quais destes parâmetros apresentaram maior influência na variação do saldo de radiação líquida em cada sítio pesquisado.

Para explicar a variação sazonal observada no fluxo de calor armazenado dentro do dossel urbano, sugere-se que nas próximas investigações sejam avaliadas as características físicas dos elementos que compõem o dossel urbano, bem como a umidade e características físicas do solo no entorno dos sítios pesquisados. Para confirmar que a quantidade de calor armazenado dentro do dossel urbano é diretamente proporcional à fração de área impermeabilizada, recomenda-se a investigação de sítios com características de ocupação diferentes dos pesquisados.

Neste mesmo sentido, para que as curvas teóricas (ver Item 5.6) para cidades de clima tropical possam ser determinadas, torna-se também necessário promover investigações em sítios urbanos com diferentes frações de áreas planas impermeáveis e vegetadas. Este critério deve nortear as escolhas dos futuros sítios a serem pesquisados.

7. BIBLIOGRAFIAS

7.1 BIBLIOGRAFIAS CITADAS

AGUILAR, E.; AUER, I.; BRUNET, M.; PETERSON, T.C.; WIERINGA, J. Guidance on metadata and homogenization. **World Meteorological Organization**, N°. 1186, (WCDMP-No. 53), 2003.

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY (AMS). Glossary of Meteorology. **American Meteorological Society**. Disponível em: <http://www.ametsoc.org/>. Acesso em: 4 Julho 2011.

ANP. Agencia Nacional de Petróleo, Gás Natural e Bicombustíveis. **Dados Estatísticos**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?id=548>. Acesso em: 4 Julho 2011.

ANANDAKUMAR, K. A study on the partition of net radiation into heat fluxes on a dry asphalt surface. **Atmospheric Environment**, v.33, p. 3911–3918, 1999.

ANDRADE, H. O Clima Urbano – Escalas de Análise e Aplicabilidade. **Finisterra**, v. 80, p.67-91, 2005.

ARNFIELD, A. J.; GRIMMOND, C. S. B. An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modelling. **Energy and Buildings**, v.27, p.61–68, 1998.

ARYA, S. P. **Introduction to Micrometeorology**. 2a. Edição, New York: Academic Press, 2001. 420p.

ASAEDA, T.; CA, V. T. The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: A numerical model. **Boundary Layer Meteorology**, v.65, p.159–179, 1993.

AYOADE, J. O. **Introdução a climatologia para os trópicos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

AUER, A. H. Correlation of land use and cover with meteorological anomalies. **Journal of Applied Meteorology**, v.17, p. 636-643, 1978.

BARRADAS, V. L.; TEJEDA-MARTÍNEZ, A.; JÁUREGUI, E. Energy balance measurements in a suburban vegetated area in Mexico City. **Atmospheric Environment**, v.22, p.4109-4113, 1999.

BARBIRATO, G. M. **Aplicação de modelo de balanço de energia para análise do ambiente térmico urbano de Maceió - AL**. 1998. 173f. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BERBET, Meire Lúcia Caldeira **A influência sazonal do albedo da superfície na mudança do padrão de chuva, em consequência da conversão da floresta tropical em pastagens.** 2002. Tese (Doutorado). 47f. Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2002.

BERKOWICZ, R.; PRAHM, L.P. Sensible heat flux estimated from routine meteorological data by the resistance method. **American Meteorological Society**, v.21, n.12, p.1845-1864, 1982.

BERTELA, M. Inconsistent surface flux partitioning by the Bowen ratio method. **Boundary Layer Meteorology**, v.49, p.149–167, 1989.

BEST, M. Representing urban areas in numerical weather prediction models. In: Proceedings of the 2nd Urban Environment Symposium, **American Meteorological Society**. p.148–151, 1998.

BIUDES, M. S. **Balço de energia em área de vegetação monodominante de Cambará e no norte do Pantanal.** 2008. 142f. Tese (doutorado), Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Pós-graduação em Agricultura Tropical, Universidade Federal de Mato Grosso, 2008.

BORBA, B. S. M. C. **Metodologia de Regionalização do Mercado de Combustíveis Automotivos no Brasil.** Dissertação de Mestrado, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review Serial**, v.2, n.27, p.779-787, 1926.

CALLEJAS, I. J. A., OLIVEIRA, A. S., SANTOS, F. M. M., DURANTE, L. C.; NOGUEIRA, M. C. J. A. Estudo comparativo de temperatura e umidade entre meio urbano e rural. In. XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC), Búzios-RJ, **Anais**. Búzios, 2011.

CALLEJAS, I. J. A., DURANTE, L. C.; NOGUEIRA, M. C. J. A. NOGUEIRA, J. . S., CAMPOS, A. C. S. Estudo do sombreamento arbóreo, atenuação da radiação solar e microclima dos pátios escolares: elementos para se pensar a sustentabilidade urbana. In. IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis (ELECS), Vitória-ES, **Anais**. Vitória, 2011.

CALLEJAS, I. J. A., DURANTE, L. C.; NOGUEIRA, M. C. J. A. RODRIGUES, T. R., LOBO, F. A., BIUDES, M. S., CAMPOS, A. C. S.. Impacto da Urbanização no Balço de Energia na Cidade de Cuiabá-MT/Brasil. In. IV Simpósio Internacional de Climatologia, João Pessoa-PB, **Anais**. João Pessoa, 2011.

CALLEJAS, I. J. A., OLIVEIRA, A. S., SANTOS, F. M. M., DURANTE, L. C.; NOGUEIRA, M. C. J. A., ZEILHOFER, P. Relationship between land use/cover and surface temperatures in the urban agglomeration of Cuiabá/Várzea Grande, central Brazil. **Journal of Applied Remote Sensing**, 5, 053569 (2011), DOI:10.1117/1.3666044.

CAMPELO, JR. J. H.; CASEIRO, F. T.; FILHO, N. P.; BELLO, G. A. C.; MAITELLI, G. T.; ZANPARONI, C. A. G. P. Caracterização macroclimática de Cuiabá. In: **Encontro Nacional de Estudos sobre o Meio Ambiente**, Londrina, Anais. Londrina, v.1, n.7, 1991.

CAMUFFO, D.; BERNARDI, A. An observational study of heat fluxes and the relationship with net radiation. **Boundary Layer Meteorology**, v.23, p.359-368, 1982.

CEMAT. Centrais Elétricas Matogrossenses. **Dados Estatísticos**. Disponível em: <<http://www.redenergia.com/>>. Acesso em: 4 Julho 2011.

CLEUGH, H. A.; OKE, T.R. Suburban-rural energy balance comparisons in summer for Vancouver, B.C. **Boundary Layer Meteorology**, v.36, p.351-369, 1986.

CHENG, H.; CASTRO, I. P. Near wall flow over an urban-like roughness. **Boundary-Layer Meteorology**, v.104, p.229-259, 2002.

COLLIER, C. G. The Impact of Urban Areas on Weather, **Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society**, Part A, v.132, p.1-25, 2006.

CHRISTEN, A.; VOGT, R. Energy and radiation balance of a central European city. **International Journal of Climatology**, v.24, n.11, p.1395-1421, 2004.

CRUTZEN, P.J., The growing urban heat and pollution “island” effect—impact on chemistry and climate. **Atmospheric Environment**, v.38, p.3539-3540, 2004.

CULF, A.D.; ESTEVES, J.L.; MARQUES FILHO, A.O.; ROCHA, H.R. Radiation, temperature and humidity over forest and pasture in Amazonia. In: GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R.L. (Eds.) **Amazonian Deforestation and Climate**, New York: J. M. Wiley and Sons, 1996, p.175-192.

DAS, Y.; PADMANABHAMURTY, B. Energy balance of a suburban vegetated area in a tropical city-Delhi (India). **Journal of Environmental Science Engineer**, v.50, n.2, p.103-113, 2008.

DAVENPORT, A.G.; GRIMMOND, C.S.B.; OKE, T.R.; WIERINGA, J. Estimating the roughness of cities and sheltered country. **Proceedings 12th Conference on Applied Climatology**, Asheville, NC, American Meteorological Society, Boston, p.96-99, 2000:.

DETRAN. Departamento Estadual de Transito de Mato Grosso – DETRAN-MT. **Estatísticas**. Disponível em: < <http://www.detrان.mt.gov.br/estatisticas>>. Acesso em: Julho/ 2011.

DOLL, D.; CHING, J. K. S.; KANESHIRO, J. Parameterization of subsurface heating for soil and concrete using net radiation data. **Boundary Layer Meteorology**, v.32, p.351–372, 1985.

DOU, J.; LIU, W.; SU, C.; WANG, Y. The Suburban Energy Balance in Shunyi, Beijing City. In: **Eighth Symposium on the Urban Environment**, 2009.

DUARTE, D. H. S. **Padrões de ocupação do Solo e Microclimas Urbanos na Região Tropical Continental**. 2000. 278f. Tese de Doutorado, Geografia Física, Departamento de Geografia. Universidade de São Paulo, 2000.

DUGAS, WA; FRITSCHEN, L.J; GAY, LW; HELD, A. A; MATTHIAS, A. D; REICOSKY, D. C; STEDUTO, P; STEINER, J. L. Bowen ratio, eddy correlation, and portable chamber measurements of sensible and latent heat flux over irrigated spring wheat. **Agricultural Forest Meteorology**, v.56, p.12–20, 1991.

DUMKE, Eliane Müller Seraphim. **Clima urbano/conforto térmico e condições de vida na cidade – uma perspectiva a partir do aglomerado urbano da região metropolitana de Curitiba (au-rmc)**. 2007. 417f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento). Universidade Federal do Paraná. Paraná, Brasil, 2007.

ELLEFSEN, R. Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundarylayer in ten US cities. **Energy and Buildings**, v.16, p. 1025-1049. 1991.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering**. New York: McGraw-Hill, 1972. 244p.

SANTANNA, F. B., ARRUDA, P. H. Z, FARIA, J. L. B., NOGUEIRA, J. S. Estudo preliminar da velocidade e direção dos ventos em Cuiabá- MT, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.16, n. 2, p.175-180, 2008.

FERREIRA, M. J. **Balço de energia na superfície da cidade de São Paulo**. 2010. 183f. Tese. (Doutorado) - Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG-USP. São Paulo. SP. Brasil, 2009.

FERREIRA, M. J.; OLIVEIRA, A. P., SOARES J. Anthropogenic heat in the city of São Paulo, Brazil. **Theory Applied Climatology**, 2010.

FISCH, G. **Camada limite Amazônica: aspectos observacionais e de modelagem**. 1996. 171f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996. (INPE 6123/TDI 584).

FORTUNIAK, W.; OFFERLE, B.; GRIMMOND, C. S. B.; PAWLAK, K. Intraurban Differences of Surface Energy Fluxes in a Central European City. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v.45, p.125–136, 2006.

FOKEN, T. 50 years of the Monin–Obukhov similarity theory. **Boundary Layer Meteorology**, v.119: p.431–447, 2006.

FOKEN, T. **Micrometeorology**. 1a. Edição, Berlin: Springer, 2008. 306p.

FOKEN, T.; LECLERC, M. Y. Methods and limitations in validation of footprint models. **Agriculture for Meteorology**, v.127, p.223–234, 2004.

FULTON, P. N. Estimating the Daytime Population with the Urban Transportation Planning Package. **Transportation Research Record**, 981, p.25-27, 1984.

GARCIA-CUETO, R.; JAUREGUI, E.; TEJEDA, A. Urban/rural energy balance observations in a desert city in northern Mexico. In: **Proc. Fifth Int. Conf. on Urban Climate**, Lodz, Poland, University of Lodz, p.177–180, 2003.

GIAMBELLUCA, T.W., FOX, J., YARNASARN, S., ONIBUTR, P., NULLET, M.A. Dry-season radiation balance of land covers replacing forest in northern Thailand. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 95, p. 53-65, 1999.

GRIMMOND, C.S.B.; CLEUGH, H.A. and OKE, T.R. An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. **Atmospheric Environment, Urban Atmosphere**, v.25, n.3, p.311-326, 1991.

GRIMMOND, C. S. B.; CLEUGH, H. A.; OKE, T.R. The role of rural in comparisons of observed of suburban-rural flux differences. In: **Ex-changes processes at the land surfaces for a range of space and times scales**, IAHS publications, v.212, p.165-174, 1993.

GRIMMOND, C. S. B.; SOUCH, C. Surface description for urban climate studies: A GIS based methodology. **Geocarto International**, v.9, p.47–59, 1994.

GRIMMOND, C.S.B.; OKE, T.R. Comparison of heat fluxes from summertime observations in the suburbs of four North American cities. **Journal of Applied Meteorology**, v.34, p.873–889, 1995.

GRIMMOND, C.S.B.; OKE, T.R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of urban form. **Journal of Applied Meteorology**, v.38, p.1262-1292, 1999.

GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Heat Storage in Urban Areas: Local-Scale Observations and Evaluation of a Simple Model. **Journal Applied Meteorology**, 38, 922-940, 1999.

GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Turbulent Heat Fluxes in Urban Areas: Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS), **Journal of Applied Meteorology**, v.41, n.7, p.792-810, 2002.

GRIMMOND, C. S. B.; SALMOND, J. A.; OKE, T. R.; OFFERLE, B.; LEMONSU, A. Flux and turbulence measurements at a densely built-up site in Marseille: Heat, mass (water and carbon dioxide), and momentum, **Journal Geophysics Res.**, 109, D24101, 2004.

GOMES, F. J. D. **Relação entre variáveis meteorológicas e cobertura do céu na região central de Cuiabá e entorno**. 2010. 59f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2010.

GOOGLE. Google Earth. Disponível em <http://earth.google.com>. Acesso em janeiro de 2010.

HARMAN, I. N. **The energy balance of urban areas**. 2003. 157f. Tese (Doutorado em Meteorologia, Departamento de Meteorologia). Universidade de Reading. 2003.

HOLTON, J. R. **An Introduction to Dynamic Meteorology**. 4a. Edição, New York: Elsevier Academic Press, 2004. 535p.

HORST, T.W., WEIL, J. C. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer. **Boundary Layer Meteorology**, v.59, p.279-296, 1992.

HORST, T.W.; WEIL, J. C. How far is far enough? The fetch requirements for micrometeorological measurements of surface fluxes. **Journal Atmospheric Oceanic Technology**, v.11, p.1018-1025, 1994.

IBGE. Instituto Brasileiro de Pesquisas Geográficas. **Estimativas Populacionais 2010**. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: Julho/ 2011.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas 1961 a 1990 - Versão revista e ampliada**. INMET. Brasília, 2009. 465p.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Programa Brasileiro de Etiquetagem: Veículos leves**. Disponível em: < <http://www.inmetro.gov.br>>. Acesso em: Julho/ 2011.

IPDU. Instituto de Pesquisas e Desenvolvimento Urbano. **Perfil Socioeconômico de Cuiabá, V..** Cuiabá: Central de Texto, 2009.

JAUREGUI, E.; OKE, T.R.; ZEUNER, G. The surface energy balance in Mexico City. **Atmospheric Environment**, v.26B, p.433-444, 1992.

JAUREGUI, E.; GRIMMOND, C. S. B; OKE, T. R.; SPROKEN-SMITH, R. A. The energy balance of central Mexico City during the dry season. **Atmospheric Environment**, v.33, p.3919-3930, 1999.

KALANDA, B. D.; OKE, T. R.; SPITTLEHOUSE, D. L. Suburban Energy Balance Estimates for Vancouver, B.C., Using the Bowen Ratio-Energy Balance Approach. **Journal of Applied Meteorology**, v. 19, n.7, p.791-802, 1980.

KARAM , H. A.; PEREIRA FILHO, A. J. Revisão dos métodos de Penman e Penman-Monteith e sua aplicação a cânions urbanos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.1, 86-106, 2006.

KATO, S.; YAMAGUCHI, Y. Estimation of storage heat flux in an urban area using ASTER data. **Remote Sensing of Environment**, v.110, p.1-17, 2007.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928.

KERSCHGENS, M. J.; HACKER, J. M. On the energy budget of the convective boundary layer over an urban and rural environment. **Contribution Atmospheric Physics.**, v.58, p.171–185, 1985.

KŁYSIK, K. Spatial and seasonal distribution of anthropogenic heat emissions in Łódź, Poland. **Atmospheric Environment**, v.30, p.3397–3404, 1995.

LIMA NETO, E.M.; SOUZA, R.M. Índices de densidade e sombreamento arbóreo em áreas verdes públicas de Aracaju, Sergipe. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba – SP, v.4, n.4, p.47-62, 2009.

LOWRY, W. P. Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis. **Journal of Applied Meteorology**. v.16, p.129-135, 1977.

MACDONALD, R. W.; GRIFFITHS, R. F.; HALL, D. J. An improved method for estimation of surface roughness of obstacle arrays. **Atmospheric Environment**, v.32, p.1857–1864, 1998.

MAITELLI, G. T. **Uma Abordagem Tridimensional de Clima Urbano em Área Tropical Continental. O Exemplo de Cuiabá – MT**. Tese de Doutorado (Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas), Universidade de São Paulo, 1994.

MAITELLI, G. T. Balanço de Energia Estimado para a Cidade de Cuiabá: Uma Abordagem de Balanço de Energia pelo Método De Bowen. **Clima Urbano e Planejamento das Cidades**, v.4, n.2, 2010. Disponível em: http://www.forumpatrimonio.com.br/view_full.php?articleID=183&modo=1. Acesso em: 4 Julho 2011.

MARCIOTTO, E. R. **Estudo da Influência de um Dossel Urbano sobre o Balanço de Energia na Superfície e Implicações na Estrutura Vertical da Camada Limite Atmosférica**. 2009. 144f. Tese de Doutorado. Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG-USP. São Paulo. SP. Brasil, 2009.

MARTILLI, A.; Clappier, A.; Rotach, M. W. An urban surface Exchange parameterisation for mesoscale models. **Boundary Layer Meteorology**, v.104, p.261–304, 2002.

MARTILLI, A. Numerical study of urban impact on boundary layer structure: Sensitivity to wind speed, urban morphology and rural soil moisture. **Journal of Applied Meteorology**, v.41, p.1247–1267, 2002.

MASCARÓ, J. L. Loteamentos Urbanos. 1° Edição. Porto Alegre: Juan Luiz Mascaró, 2003. 210p.

MASCARÓ, L; MASCARÓ, J. **Vegetação urbana**. 2.ed. Porto Alegre: Mais Quatro editora, 2005. 204 p.

MEYN, S. K. **Heat fluxes through roofs and their relevance to estimates of urban heat storage**. 2000. 106f. Tese (Mestrado), Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia, 2000.

MEYN, S., OKE, T. R. Heat Fluxes Through Roofs and Their Relevance to Estimates of Urban Heat Storage. **Energy and Building**, v.41, p.745-752, 2009.

MIRANDA, L. M. Trafego Médio Diário da Avenida Miguel Sutil. **Apostila da disciplina de Transportes**. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Mato Grosso - UFMT, 2009.

MORENO, M. M. **Parâmetros para implantação efetiva de áreas verdes em bairros periféricos de baixa densidade**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

MORIWAKI, R.; KANDA, M. Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor and CO₂ over a suburban area. **Journal of Applied Meteorology**, v.43, p.1700-1710, 2004.

NARITA, K.; T. Sekine; Tokuoka, T. Thermal properties of urban surface materials- Study on heat balance at asphalt pavement. **Geographical review of Japan**, v.57, p.639–651, 1984.

NOVAK, M. D. **The moisture and thermal regimes of a bare soil in the Lower Fraser Valley during spring**. 1981. 153f. Tese (Doutorado), Universidade de British Columbia, Vancouver, Canadá, 1981.

NUNES, L. H. A escala nas Ciências Atmosféricas. **Revista IG São Paulo**, v. 19, p. 71-73, 1998.

NUNEZ, M. **The energy balance of an urban canyon**. 1974. 161f. Tese (Doutorado), Universidade de British Columbia, Vancouver, Canadá, 1974.

NUNEZ, M.; OKE, T. R. The Energy Balance of an Urban Canyon. **Journal of Applied Meteorology**, v. 16, 1977.

OFFERLE, B. **The energy balance of an urban area: Examining temporal and spatial variability through measurements, remote sensing and modeling**. 2003. 220f. Tese de Doutorado. Universidade de Indiana, Estados Unidos, 2003.

OFFERLE, B.; JONSSON, P.; ELIASSON, I.; GRIMMOND, C. S. B. Urban Modification of the Surface Energy Balance in the West African Sahel: Ouagadougou, Burkina Faso. **Journal of Climate**, v.18, n.19, p. 3983–3995, 2005.

OFFERLE, B.; GRIMMOND, C. S. B.; FORTUNIAK, K. Heat Storage and Anthropogenic Heat Flux in Relation to the Energy Balance of a Central European City Centre. **International Journal of Climatology**, v.25, p.1405-1419, 2005.

OLIVEIRA, A. S. **Análise de desempenho térmico e consumo de energia em residências na cidade de Cuiabá**. Cuiabá, 2007. 107f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente), Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2007.

OLIVEIRA, A. S. de, SANTOS, F. M. de M., FRANCO, F. M., DURANTE, L. C., CALLEJAS, I. J. A., NOGUEIRA, M. C. de J. A. Estudo da cobertura vegetal arbórea em praças urbanas – Cuiabá/Brasil. In: XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2011, Búzios. **Anais**. Búzios, 2011.

ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.56, n.5, p. 527-530, 1975.

OKE, T. R.; YAP, D. Sensible Heat Fluxes over an Urban Area - Vancouver, BC. **Journal of Applied Meteorology**, v. 13, 1974.

OKE, T. R.; KALANDA, B. D. Suburban Energy Balance Estimates for Vancouver, B.C., Using the Bowen Ratio–Energy Balance Approach. **Journal of Applied Meteorology**, v. 19, 1980.

OKE, T. R.; KATANDA, B. D.; STEYN, D. G. Parameterization of heat storage in urban areas. **Urban Ecology**, v.5, p.45-54, 1981.

OKE, T. R. The Energetic Basis of the Urban Heat Island. **Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society**, 108, p.1-24, 1982.

OKE, T.R. Methods in urban climatology. **Applied climatology**, v.14, p.19-29, 1984.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2a. Edição, New York: Routledge, 1987. 435p.

OKE, T. R.; CLEUGH, H. A. Urban heat storage derived as energy budget residual. **Boundary Layer Meteorology**, v.39, p.233-245, 1987.

OKE, T. R. The Urban Energy Balance. **Progress in Physical Geography**, v.12, p.471-508, 1988.

OKE, T. R.; JOHNSON, G.T.; STEYN, D.G.; WATSON, I. D. Simulation of surface urban heat islands under “ideal” conditions at night Part 1: Theory and Tests Against Field Data. **Boundary Layer Meteorology**, v. 56, p. 275–294, 1991.

OKE, T. R. Initial guide to obtain representative meteorological observations at urban site. **World Meteorological Organization**. Canadá, 2006. Disponível em: www.wmo.int/pages/prog/.../IOM-81-UrbanMetObs.pdf. Acesso em: 4 Julho 2011.

ORTEGA-FARIAS, S.O.; CUENCA, R.H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.81, 131–143, 1996.

PEIKORZ, G., **Die Energiebilanz einer städtischen Struktur**. 1987. Tese de Doutorado, Departamento de Meteorologia, Universidade de Rheinische Friedrich-Wilhelms, Bonn, Alemanha, 1987.

PEREZ, P.J., CASTELLVI, F., ROSELL, J.I., IBAÑEZ, M. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.97, n.3, p.141–150, 1999.

PIGEON, G.; MOSCICKI, M. A.; VOOGT, J. A.; MASSON, V. Simulation of fall and winter surface energy balance over a dense urban area using the TEB scheme. **Meteorology Atmospheric Physics**, v.102, p.159–171, 2008.

PIGEON, G., LEGAIN, D., DURAND, P., MASSON, V. Anthropogenic Heat Release in an Old European Agglomeration (Toulouse, France). **International Journal of Climatology**, 27,p.1969-1981, 2007.

PIRINGER, M.; GRIMMOND, C. S. B.; JOFFRE,S.M; MESTAYER, P.; MIDDLETON, D. R.; ROTACH, M.W.; BAKLANOV, A.; RIDDER, K.; DEFERREIRA, J.; GUILLOTEAU, E.; KARPPINEN, A.; MARTILLI, A.; MASSON, V.; TOMBROU, M. Investigating the surface energy balance in urban areas – recent advances and future needs. **Water, Air, and Soil Pollution: Focus**, v.2, p.1–16, 2002.

RAFAILIDIS, S. Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town. **Boundary Layer Meteorology**, v.85, p.255–271, 1997.

RAUPACH, M. R., THOM, A. S., EDWARDS, I. A wind-tunnel study of turbulent flow close to regularly arrayed rough surfaces. **Boundary Layer Meteorology**, v.18, p.373–397, 1980.

RIBEIRO, J. B. M. **Análise comparativa das características microclimáticas entre áreas de floresta e de pastagem na Amazônia**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 67 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1994.

ROBERTS, S. M.; OKE, T. R.; GRIMMOND, C. S. B.; VOOGT, J. A. Comparison of Four Methods to Estimate Urban Heat Storage. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 45, n.12, p. 1766-1781, 2006.

ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. 2ª. Edição. São Paulo: Projeto, 2001.

ROTACH, M. W. Turbulence close to a rough urban surface. Part I: Reynolds stresses. **Boundary-Layer Meteorology**, v.65, p. 1-28, 1993

ROTH, M.; OKE, T. R. Comparison of modelled and “measured” heat storage in suburban terrain. **Contribution Atmospheric Physics.**, v.67, p.149–156, 1994.

ROTH, M.: Review of atmospheric turbulence over cities, **Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society**, v. 126, p.941-990, 2000.

ROTH, M.; QUAH A. K. L. Spatial and temporal distribution of anthropogenic heat emissions in singapore. In: **The seventh International Conference on Urban Climate**, Yokohama, Japan, 2009.

SANTANNA, F. B.; ARRUDA, P. H. Z. ; FARIA, J. L. B.; NOGUEIRA, J. S. Estudo preliminar da velocidade e direção dos ventos em Cuiabá/ MT, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, p. 153-158, 2008.

SAILOR, D.J.; LU, L. A top—down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. **Atmospheric Environment**, v.38, 2737–2748, 2004.

SAILOR, D. J, HART, M. An anthropogenic heating database for major U.S. cities. In: **Sixth Symposium on the Urban Environment**, Atlanta GA, Jan 28-Feb 2, American Meteorological Society, Boston, Paper 5.6, 2006.

SCHMID, H. P.; CLEUGH, H. A.; GRIMMOND, C. S. B., OKE, T.R. Spatial Variability of Energy Fluxes in Suburban Terrain. **Boundary Layer Meteorology**, v.54, p.249-276, 1991.

SCHMID, H. P. Source Areas for Scalars and Scalar Fluxes. **Boundary Layer Meteorology**, v.67, p.293–318, 1994.

SCHMID, H. P. Experimental design for flux measurements: Matching scales of observations and fluxes, **Agricultural and Forest Meteorology**, v.87, p.179– 200, 1997.

SCHMID, H. P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective, **Agricultural and Forest Meteorology**, v.113, p.159– 183, 2002.

SCHMIDT, W. **Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen**. Henri Grand Verlag, Hamburg, 118p. 1925.

SICME. SECRETARIA DE INDÚSTRIA, COMÉRCIO, MINAS E ENERGIA. **Balço energético do Estado de Mato Grosso e mesorregiões – BEEMT 2010: ano base 2009 / NIEPE** . Cuiabá: Multicor, 2010. 240p.

SIMOES, L.O. de C., MAROTTA, H., PIRES, B.B.M., UMBELINO, L. F., COSTA, A. J. S. T. Índices de Arborização em espaço urbano: um estudo de caso no bairro de Vila Isabel, Rio de Janeiro, RJ. In: IX ENCONTRO NACIONAL DE ARBORIZAÇÃO URBANA. **Anais**. Brasília, 2001.

STULL, R. B. **Meteorology for scientists and engineers**. 1a. Edição, Holanda: Brooks/Cole -Thompson Learning. 2000. 502 p.

THORNTHWAITE, C.W.; HOLZMAN, B. The determination of evaporation from land and water surfaces. **Monthly Weather Review**, v.64, n.1, p.4-11, 1939.

TEJEDA MARTINEZ, A.; JAUREGUI, E. Surface energy balance measurements in the México City region: a review. **Atmósfera**, v.18, n.1, p. 1-23, 2005.

UNLAND, H.E.; HOUSER, P.R.; SHUTTLEWORTH, W.J.; YANG, Z.L. Surface flux measurement and modelling at a semi-arid Sonoran Desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.82, 119–153, 1996.

VESALA, T.; JÄRVI, L.; LAUNIAINEN, S.; SOGACHEV, A.; RANNIK, Ü.; MAMMARELLA, I.; SIIVOLA, E.; KERONEN, P.; RINNE, J.; RIIKONEN, A.; NIKINMAA, E. Surface-atmosphere interactions over complex urban terrain in Helsinki, Finland, **Tellus B**, v.60, p.188-199, 2008.

VAN ULDEN, A. P. Simple Estimates for Vertical Diffusion from Sources near the Ground. **Atmospheric Environmental**. v.12, p.2125-2129, 1978.

VU, T. C.; ASHIE, Y.; ASAEDA, T. A $k-\epsilon$ turbulence closure model for the atmospheric boundary layer including urban canopy. **Boundary Layer Meteorology**, v.102, p.459–490, 2002.

XU, W.; WOOSTER, M.J.; GRIMMOND, C.S.B. Modelling of urban sensible heat flux at multiple spatial scales: A demonstration using airborne hyperspectral imagery of Shanghai and a temperature–emissivity separation approach. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.3493-3510, 2008.

WILSON, K. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.113, p.223–243, 2002.

YANG, L. Integration of a numerical model and remotely sensed data to study urban/rural land surface climate processes. **Computers and Geosciences**. v. 26, p.451-468, 2000.

YOSHIDA, A.; TOMINAGA, K.; WATATANI, S. Field measurements on energy balance of an urban canyon in the summer season. **Energy Building**, v.15-16, p.417-423, 1990-1991.

7.2 BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **Internacional Jornal of Climatology**, v. 23, p.1-26. 2003.

BARBIRATO, G. M.; SOUZA, L. C. L.; TORRES, S. C. **Clima e cidade: A abordagem climática como para estudos urbanos**. UFAL, Maceió, 2007.

BERTACCHI, M. L., FARIA, J. R. G. (2005) Ilhas de calor na cidade de Bauru (SP): as diferenças de temperatura e a configuração do solo local. **In: VIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 2005. Maceió. Anais. Maceió: ANTAC, 646-652.

BUENO, C. L. **A influência da vegetação no conforto térmico urbano e no Ambiente construído**. Tese (Doutorado em Saneamento e Ambiente) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. 186 p., Campinas, 2003.

CHATZIDIMITRIOU, A.; CHRISOMALLIDOU, N.; YANNAS, S. Microclimate modifications of an urban street in northern Greece. **In: PLEA 2005 – PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE**, 2005, BEIRUT, p. 689-694.

DUARTE, Denise, SERRA, Geraldo. Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental. Correlações e proposta de um indicador. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 7-20, 2003.

DUMKE, E. M. S. **Clima urbano/conforto térmico e condições de vida da cidade (uma perspectiva a partir do aglomerado urbano da Região Metropolitana de Curitiba (AU-RMC))**. Curitiba, 2007. 417f. Tese (Programa de Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

GRIMMOND, C. S. B; SOUCH, C. Surface description for urban climate studies: A GIS based methodology. **Geocarto International**, v.9, p.47-59, 1994.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. **Teoria e Clima urbano**. Série Teses e Monografias, SP, nº25, 1976.

OFFERLE, B. D.; GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Parameterization of net all-wave radiation for urban areas. **Journal of Applied Meteorology**, v.42, p.1157-1173, 2003.

OKE, T. R., The energetic basis of the urban heat island. **Quarter Journal Royal Meteorology Society**, v. 108, p.1–24, 1982.

OKE, T. R. Evapotranspiration in urban areas and its implication for urban climate planning. **In: Conference Teaching the Teachers on Building Climatology. Proceedings. The Nacional Swedish Institute for Building Research**, v.2, 1973.

ROTACH, M. Turbulence Close to a Rough Urban Surface Part II: Variances and Gradients. **Boundary Layer Meteorology**, v.65, p.1-28, 1993.

ROTACH, M. W.; CALANCA, P.; WEIGEL, A. H.; ANDRETTA, M. On the closure of the surface energy balance in highly complex terrain. **Proc. Int. Conf. on Alpine Meteorology and MAP Meeting 2003**, Brig, Switzerland, MeteoSwiss, p.247–250, 2003.

SHASHUA-BAR, M .E.; HOFFMAN, L. Vegetation as a climatic component in the design of na urban street. An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. **Energy and Buildings**, n. 31, p.221-235, 2000.

SAILOR, D. J.; FAN, H. Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities. **Atmospheric Environmental**, v.36, p.713–725, 2002.

KONDO, H, KIKEGAWA, Y. Temperature variation in the urban canopy with anthropogenic energy use. **Pure and Applied Geophysics**, v.160, p.317–324, 2003.

ANEXOS

Tabela A – Intensidade máxima, amplitude e radiação solar global média mensal para os meses de setembro de 2010 a agosto de 2011 para os Sítios 1, 2 e 3.

Mês	Estatística	Sítio 1	Sítio 2	Sítio 3
		Radiação Solar	Radiação Solar	Radiação Solar
Set	Máximo	755,84	742,59	770,37
	Amplitude	755,84	742,59	770,37
	Rg médio ($W m^{-2}$) \pm DP	376,73 \pm 248,69	381,22 \pm 248,93	383,94 \pm 251,37
	Rg médio($MJ m^{-2} dia^{-1}$) \pm DP	16,40 \pm 2,97	16,95 \pm 2,46	17,19 \pm 2,55
Out	Máximo	800,08	727,31	748,64
	Amplitude	800,08	727,31	748,64
	Rg médio ($W m^{-2}$) \pm DP	375,69 \pm 248,75	378,08 \pm 250,14	373,30 \pm 247,35
	Rg médio($MJ m^{-2} dia^{-1}$) \pm DP	17,83 \pm 6,01	17,94 \pm 6,13	17,72 \pm 5,90
Nov	Máximo	595,00	715,21	730,17
	Amplitude	595,00	715,21	730,17
	Rg médio ($W m^{-2}$) \pm DP	297,43 \pm 183,59	290,71 \pm 215,39	355,65 \pm 227,08
	Rg médio($MJ m^{-2} dia^{-1}$) \pm DP	14,48 \pm 4,29	14,15 \pm 4,55	17,31 \pm 6,41
Dez	Máximo	837,08	869,46	808,93
	Amplitude	837,08	869,46	808,93
	Rg médio ($W m^{-2}$) \pm DP	361,96 \pm 232,33	392,94 \pm 264,77	377,47 \pm 251,37
	Rg médio($MJ m^{-2} dia^{-1}$) \pm DP	17,72 \pm 4,85	19,24 \pm 5,37	18,48 \pm 4,75
Jan	Máximo	851,83	811,92	803,12
	Amplitude	851,83	811,92	803,12
	Rg médio ($W m^{-2}$) \pm DP	356,51 \pm 244,70	332,77 \pm 250,70	349,33 \pm 240,97
	Rg médio($MJ m^{-2} dia^{-1}$) \pm DP	17,41 \pm 3,92	16,10 \pm 3,60	17,05 \pm 3,65
Fev	Máximo	681,82	810,19	726,61
	Amplitude	681,82	810,19	726,61
	Rg médio ($W m^{-2}$) \pm DP	345,45 \pm 211,49	355,84 \pm 245,91	329,73 \pm 206,22
	Rg médio($MJ m^{-2} dia^{-1}$) \pm DP	16,10 \pm 4,18	16,84 \pm 4,46	15,67 \pm 3,66
Mar	Máximo	716,35	771,15	683,69
	Amplitude	716,35	771,15	683,69
	Rg médio ($W m^{-2}$) \pm DP	340,42 \pm 225,76	350,54 \pm 237,07	342,43 \pm 227,28
	Rg médio($MJ m^{-2} dia^{-1}$) \pm DP	15,65 \pm 3,41	16,11 \pm 3,35	15,74 \pm 3,31
Abr	Máximo	803,29	834,42	818,54
	Amplitude	803,29	834,42	818,54
	Rg médio ($W m^{-2}$) \pm DP	415,31 \pm 258,32	417,89 \pm 268,03	404,66 \pm 263,00
	Rg médio($MJ m^{-2} dia^{-1}$) \pm DP	18,34 \pm 2,89	18,45 \pm 2,54	17,87 \pm 2,63
Mai	Máximo	696,23	683,16	707,87
	Amplitude	696,23	683,16	707,87
	Rg médio ($W m^{-2}$) \pm DP	361,75 \pm 231,44	374,73 \pm 232,05	359,78 \pm 242,78
	Rg médio($MJ m^{-2} dia^{-1}$) \pm DP	15,98 \pm 3,89	16,10 \pm 3,85	15,46 \pm 3,53
Jun	Máximo	683,38	683,59	685,29
	Amplitude	683,38	683,59	685,29
	Rg médio ($W m^{-2}$) \pm DP	371,95 \pm 228,84	365,77 \pm 229,92	362,16 \pm 235,93
	Rg médio($MJ m^{-2} dia^{-1}$) \pm DP	15,76 \pm 2,97	15,50 \pm 2,94	15,35 \pm 2,82
Jul	Máximo	674,14	639,29	652,20
	Amplitude	674,14	639,29	652,20
	Rg médio ($W m^{-2}$) \pm DP	353,50 \pm 214,52	348,67 \pm 215,97	342,40 \pm 228,07
	Rg médio($MJ m^{-2} dia^{-1}$) \pm DP	15,19 \pm 5,13	14,98 \pm 5,05	14,72 \pm 5,01
Ago	Máximo	749,34	735,46	771,91
	Amplitude	749,34	735,46	771,91
	Rg médio ($W m^{-2}$) \pm DP	399,39 \pm 246,86	392,83 \pm 244,51	394,87 \pm 261,24
	Rg médio($MJ m^{-2} dia^{-1}$) \pm DP	17,72 \pm 4,07	17,23 \pm 4,02	17,32 \pm 3,81
Ano	Rg médio ($W m^{-2}$)\pmDP	361,11\pm231,50	360,37\pm241,94	361,01\pm240,22
	Rg médio($MJ m^{-2} dia^{-1}$)\pmDP	16,68\pm4,07	16,63\pm4,03	16,66\pm4,00

Tabela B – Testes estatísticos realizados com os dados meteorológicos coletados e com os dados do balanço de energia estimados nos Sítios 1, 2 e 3.

Variável	Período	Teste de normalidade					Teste não paramétrico		
		Estatística	Shapiro-Wilk			Estatística	Kruskal-Wallis		
			Sítio 1	Sítio 2	Sítio 3		1-2	1-3	2-3
Temperatura do ar (T)	seca	W	0,975	0,975	0,975	H _c	10,29	5,865	0,855
		p-value	0	0	0	p-value	0,001	0,015	0,355
	chuva	W	0,929	0,925	0,922	H _c	14,96	69,63	20,88
		p-value	0	0	0	p-value	0,001	0	0
Umidade do ar (UR)	seca	W	0,977	0,977	0,980	H _c	17,68	0,019	19,17
		p-value	0	0	0	p-value	0	0,913	0
	chuva	W	0,959	0,950	0,952	H _c	40,74	29,41	1,653
		p-value	0	0	0	p-value	0	0	0,045
Velocidade do ar (V)	seca	W	0,905	0,875	0,956	H _c	1401	3,594	1537
		p-value	0	0	0	p-value	0	0,057	0
	chuva	W	0,932	0,913	0,958	H _c	1462	87,67	1941
		p-value	0	0	0	p-value	0	0	0
Radiação Solar Incidente (R _g)	seca	W	0,745	0,736	0,731	H _c	0,022	0,052	0,003
		p-value	0	0	0	p-value	0,883	0,818	0,949
	chuva	W	0,730	0,717	0,726	H _c	0,04	0,113	0,010
		p-value	0	0	0	p-value	0,848	0,736	0,919
Fluxos de Calor Antropogênico (Q _F)		W	0,842	0,854	0,912	H _c	2,263	0,094	1,402
		p-value	0	0	0	p-value	0,322	0,7587	0,236
Calor Armazenado Dossel Urbano (ΔQ _s)	seca	W	0,696	0,708	0,697	H _c	87,77	877,1	160,3
		p-value	0	0	0	p-value	0	0	0
	chuva	W	0,698	0,709	0,693	H _c	780,70	8,808	1147
		p-value	0	0	0	p-value	0	0,003	0
Saldo de Radiação (Q [*])	seca	W	0,693	0,685	0,684	H _c	5,909	83,49	210,5
		p-value	0	0	0	p-value	0,015	0	0
	chuva	W	0,695	0,691	0,689	H _c	78,08	235,4	14,58
		p-value	0	0	0	p-value	0	0	0,001
Fluxo de Calor Latente (Q _E)	seca	W	0,718	0,711	0,700	H _c	412,8	1,016	348,1
		p-value	0	0	0	p-value	0	0,313	0
	chuva	W	0,725	0,715	0,680	H _c	120,5	155,5	10,74
		p-value	0	0	0	p-value	0	0	0,001
Fluxo de Calor Sensível (Q _H)	seca	W	0,711	0,699	0,706	H _c	1,601	108,2	117,1
		p-value	0	0	0	p-value	0,205	0	0
	chuva	W	0,712	0,650	0,693	H _c	401,6	55,76	908,6
		p-value	0	0	0	p-value	0	0	0

Tabela C– Valores mínimos, máximos, amplitude e médias diárias da temperatura e umidade do ar - meses de setembro /2010 a agosto /2011 para os Sítios 1, 2 e 3.

Mês	Estatística	Sítio 1		Sítio 2		Sítio 3	
		Temp. (°C)	Umidade (%)	Temp. (°C)	Umidade (%)	Temp. (°C)	Umidade (%)
Set	Mínimo	27,65	25,50	25,76	25,14	27,15	25,32
	Máximo	38,97	51,56	38,84	58,06	38,46	51,50
	Amplitude	11,31	26,07	13,08	32,91	11,30	26,18
	Média±DP	32,83±3,79	39,22±8,43	32,02±4,33	41,09±10,58	32,33±3,76	38,87±8,57
Out	Mínimo	25,31	44,26	24,84	44,51	24,80	45,47
	Máximo	34,95	74,02	34,91	76,67	34,08	74,60
	Amplitude	9,63	29,76	10,07	32,16	9,27	29,13
	Média±DP	29,79±3,15	59,31±9,85	29,62±3,32	60,06±10,61	29,25±3,12	60,07±9,78
Nov	Mínimo	24,80	53,81	24,44	54,89	24,20	56,50
	Máximo	32,77	82,65	32,72	84,84	32,08	84,65
	Amplitude	7,97	28,83	8,27	29,95	7,88	28,15
	Média±DP	28,43±2,59	68,80±9,23	28,17±2,70	70,69±9,86	27,76±2,58	70,91±9,23
Dez	Mínimo	25,73	52,50	25,22	54,28	24,99	53,99
	Máximo	33,46	80,42	33,42	84,47	32,77	82,55
	Amplitude	7,73	27,92	8,21	30,20	7,78	28,56
	Média±DP	29,13±2,58	67,57±9,13	28,78±2,75	70,09±10,25	28,29±2,62	70,22±9,49
Jan	Mínimo	24,42	57,20	24,15	61,68	23,87	61,38
	Máximo	33,21	90,59	32,52	93,02	32,02	91,82
	Amplitude	8,79	33,38	8,37	31,34	8,15	30,44
	Média±DP	28,00±2,83	76,55±10,68	27,42±2,75	80,75±10,35	27,06±2,64	79,98±9,98
Fev	Mínimo	24,54	62,03	24,25	63,92	23,89	64,80
	Máximo	32,09	90,46	31,99	92,63	31,22	91,93
	Amplitude	7,55	28,44	7,74	28,70	7,34	27,13
	Média±DP	27,81±2,45	78,08±9,59	27,60±2,48	80,04±9,51	27,03±2,37	80,40±9,18
Mar	Mínimo	24,53	64,33	24,25	66,10	24,06	65,40
	Máximo	31,95	92,78	31,98	94,46	31,41	93,49
	Amplitude	7,42	28,45	7,74	28,36	7,34	28,09
	Média±DP	27,39±2,48	81,77±9,60	27,23±2,57	83,50±9,44	26,87±2,47	82,81±9,40
Abr	Mínimo	24,76	52,01	24,26	53,04	24,36	53,73
	Máximo	34,43	88,25	34,33	91,77	33,53	88,01
	Amplitude	9,66	36,24	10,07	38,73	9,17	34,29
	Média±DP	28,85±3,19	72,00±12,18	28,60±3,34	74,58±12,94	28,28±3,07	73,09±11,56
Mai	Mínimo	21,46	47,06	20,93	46,91	21,24	48,02
	Máximo	32,12	86,06	32,30	89,32	31,68	85,04
	Amplitude	10,65	39,00	11,37	42,41	10,44	37,01
	Média±DP	26,39±4,08	67,70±9,46	26,25±4,61	69,27±12,18	26,14±3,86	67,67±8,80
Jun	Mínimo	20,66	40,12	19,61	41,23	20,56	40,91
	Máximo	32,78	81,12	32,50	87,44	32,14	79,39
	Amplitude	12,12	41,01	12,89	46,22	11,58	38,47
	Média±DP	26,30±4,03	61,23±14,02	25,69±4,28	65,10±15,77	26,01±3,85	60,83±13,03
Jul	Mínimo	21,16	37,64	19,95	37,54	21,23	38,28
	Máximo	33,20	72,07	33,10	78,95	32,37	69,89
	Amplitude	12,04	34,43	13,15	41,42	11,14	31,61
	Média±DP	26,89±4,07	55,00±11,68	26,21±4,50	58,47±14,33	26,58±3,74	54,32±10,49
Ago	Mínimo	22,43	31,26	20,96	30,95	22,40	31,21
	Máximo	34,72	59,76	34,82	67,06	34,18	58,34
	Amplitude	12,29	28,50	13,87	36,11	11,78	27,13
	Média±DP	28,40±4,08	45,00±9,47	27,76±4,61	47,90±12,18	28,11±3,86	44,51±8,80
Ano	Média±DP	28,24±5,09	64,77±20,91	27,84±5,01	67,38±20,69	27,69±4,88	65,88±21,13

Tabela D – Valores mínimos, máximos, amplitude e médias diárias da velocidade do ar para os meses de setembro de 2010 a agosto de 2011 para os Sítios 1, 2 e 3

Mês	Estatística	Sítio 1	Sítio 2	Sítio 3
		Vel. do ar (m/s)	Vel. do ar (m/s)	Vel. do ar (m/s)
Set	Mínimo	0,46	0,06	0,71
	Máximo	1,95	1,22	1,91
	Amplitude	1,49	1,16	1,20
	Média±DP	1,01±0,40	0,48±0,32	1,19±0,32
Out	Mínimo	0,60	0,22	0,70
	Máximo	1,84	1,03	1,84
	Amplitude	1,24	0,81	1,14
	Média±DP	1,10±0,32	0,55±0,25	1,18±0,27
Nov	Mínimo	0,56	0,18	0,69
	Máximo	1,78	1,02	1,68
	Amplitude	1,22	0,84	0,98
	Média±DP	1,06±0,35	0,50±0,25	1,13±0,29
Dez	Mínimo	0,47	0,15	0,70
	Máximo	1,80	0,95	1,83
	Amplitude	1,33	0,81	1,12
	Média±DP	1,04±0,39	0,49±0,24	1,21±0,29
Jan	Mínimo	0,37	0,09	0,58
	Máximo	1,73	0,78	1,66
	Amplitude	1,36	0,69	1,09
	Média±DP	0,91±0,36	0,37±0,21	1,01±0,33
Fev	Mínimo	0,45	0,09	0,41
	Máximo	1,63	0,87	1,62
	Amplitude	1,18	0,78	1,22
	Média±DP	0,91±0,33	0,37±0,22	1,01±0,35
Mar	Mínimo	0,41	0,09	0,55
	Máximo	1,69	0,90	1,76
	Amplitude	1,28	0,81	1,21
	Média±DP	0,92±0,34	0,39±0,24	1,09±0,33
Abr	Mínimo	0,38	0,04	0,40
	Máximo	1,58	0,95	1,54
	Amplitude	1,20	0,92	1,14
	Média±DP	0,89±0,35	0,38±0,28	0,86±0,31
Mai	Mínimo	0,63	0,19	0,52
	Máximo	1,57	1,02	1,30
	Amplitude	0,94	0,83	0,78
	Média±DP	1,02±0,38	0,47±0,31	0,89±0,36
Jun	Mínimo	0,53	0,11	0,50
	Máximo	1,62	0,96	1,58
	Amplitude	1,09	0,85	1,09
	Média±DP	0,95±0,33	0,36±0,27	0,90±0,34
Jul	Mínimo	0,59	0,13	0,58
	Máximo	1,83	1,08	1,73
	Amplitude	1,23	0,95	1,15
	Média±DP	1,01±0,35	0,46±0,30	0,99±0,33
Ago	Mínimo	0,55	0,15	0,57
	Máximo	1,89	1,24	1,87
	Amplitude	1,33	1,09	1,29
	Média±DP	1,12±0,38	0,53±0,31	1,14±0,36
Estação Seca	Média±DP	1,02±0,06	0,46±0,06	1,02±0,13
Estação Úmida	Média±DP	0,97±0,09	0,44±0,08	1,07±0,12
Média anual	Média±DP	1,00±0,67	0,45±0,44	1,05±0,68

Tabela E – Fração de área e coeficientes ponderados a_1 , a_2 e a_3 para o entorno do Sítio 1 ao longo dos meses do ano

Sítio 1	Fração	Vegetação ¹	Solo ²	Concreto ³	Asfalto	Telhado	Cânion	Área Ativa
	Área (%)	11,42	7,99	9,07	12,65	33,98	24,88	100,00
Mês	Coef.	Vegetação	Solo	Concreto	Asfalto	Telhado	Cânion	Ponderado
Janeiro	a_1	0,01	0,18	0,20	0,84	0,07	0,52	0,29
	a_2	0,00	-0,04	-0,19	-0,83	0,06	0,03	-0,10
	a_3	-2,27	-25,57	-25,43	-19,29	-5,00	-33,70	-17,14
Fevereiro	a_1	0,01	0,21	0,22	0,84	0,07	0,52	0,30
	a_2	0,00	0,00	-0,23	-0,83	0,06	0,03	-0,10
	a_3	-2,34	-25,60	-19,44	-19,29	-5,00	-33,70	-16,60
Março	a_1	0,02	0,15	0,26	0,84	0,07	0,52	0,30
	a_2	0,00	0,01	-0,30	-0,83	0,06	0,03	-0,11
	a_3	-2,90	-19,94	-15,65	-19,29	-5,00	-33,70	-15,87
Abril	a_1	0,01	0,11	0,30	0,84	0,07	0,52	0,30
	a_2	0,01	0,01	-0,51	-0,83	0,06	0,03	-0,12
	a_3	-2,21	-9,10	-15,59	-19,29	-5,00	-33,70	-14,92
Maio	a_1	0,01	0,52	0,29	0,84	0,07	0,52	0,33
	a_2	0,00	-0,11	-0,80	-0,83	0,06	0,03	-0,16
	a_3	-2,20	-11,34	-10,71	-19,29	-5,00	-33,70	-14,65
Junho	a_1	0,02	0,27	0,25	0,84	0,07	0,52	0,31
	a_2	-0,02	-0,18	-0,78	-0,83	0,06	0,03	-0,17
	a_3	-2,58	-26,40	-10,09	-19,29	-5,00	-33,70	-15,85
Julho	a_1	0,01	0,29	0,27	0,84	0,07	0,52	0,31
	a_2	-0,02	-0,21	-0,93	-0,83	0,06	0,03	-0,18
	a_3	-2,34	-27,15	-10,25	-19,29	-5,00	-33,70	-15,89
Agosto	a_1	0,03	0,29	0,27	0,84	0,07	0,52	0,31
	a_2	-0,06	-0,21	-0,77	-0,83	0,06	0,03	-0,17
	a_3	-5,02	-27,15	-11,34	-19,29	-5,00	-33,70	-16,30
Setembro	a_1	0,26	0,35	0,11	0,84	0,07	0,52	0,33
	a_2	-0,40	0,00	-0,22	-0,83	0,06	0,03	-0,14
	a_3	-3,67	-19,63	1,13	-19,29	-5,00	-33,70	-14,41
Outubro	a_1	0,03	0,33	0,09	0,84	0,07	0,52	0,30
	a_2	-0,02	-0,03	-0,11	-0,83	0,06	0,03	-0,09
	a_3	-6,65	-27,41	-13,59	-19,29	-5,00	-33,70	-16,71
Novembro	a_1	0,02	0,24	0,15	0,84	0,07	0,52	0,29
	a_2	-0,01	0,00	-0,19	-0,83	0,06	0,03	-0,10
	a_3	-3,56	-28,58	-14,93	-19,29	-5,00	-33,70	-16,57
Dezembro	a_1	0,02	0,21	0,17	0,84	0,07	0,52	0,29
	a_2	-0,04	-0,06	-0,18	-0,83	0,06	0,03	-0,10
	a_3	-3,89	-25,23	-20,96	-19,29	-5,00	-33,70	-16,89
Média	a_1	0,04	0,26	0,22	0,84	0,07	0,52	0,30
	a_2	-0,05	-0,07	-0,43	-0,83	0,06	0,03	-0,13
	a_3	-3,30	-22,76	-13,90	-19,29	-5,00	-33,70	-15,98

1 Valores de RMSE na vegetação variaram de 1,40 (julho) a 8,66 $W m^{-2}$ (agosto).

2 Valores de RMSE no solo variaram de 1,43 (abril) a 21,37 $W m^{-2}$ (outubro).

3 Valores de RMSE no concreto variaram de 10,94 (setembro) a 71,50 $W m^{-2}$ (abril).

Tabela F 14– Fração de área e coeficientes ponderados a_1 , a_2 e a_3 para o entorno do Sítio 2 ao longo dos meses do ano.

Sítio 2	Fração	Vegetação ¹	Solo ²	Concreto ³	Asfalto	Telhado	Cânion	Área Ativa
	Área (%)	11,42	7,99	9,07	12,65	33,98	24,88	100,00
Mês	Coef.	Vegetação	Solo	Concreto	Asfalto	Telhado	Cânion	Ponderado
Janeiro	a_1	0,01	0,18	0,28	0,84	0,07	0,52	0,26
	a_2	0,00	-0,04	-0,01	-0,83	0,06	0,03	-0,09
	a_3	-2,27	-25,57	-0,19	-19,29	-5,00	-33,70	-15,27
Fevereiro	a_1	0,01	0,21	0,31	0,84	0,07	0,52	0,27
	a_2	0,00	0,00	-0,09	-0,83	0,06	0,03	-0,09
	a_3	-2,34	-25,60	0,14	-19,29	-5,00	-33,70	-15,24
Março	a_1	0,02	0,15	0,30	0,84	0,07	0,52	0,26
	a_2	0,00	0,01	-0,14	-0,83	0,06	0,03	-0,09
	a_3	-2,90	-19,94	-0,41	-19,29	-5,00	-33,70	-13,70
Abril	a_1	0,01	0,11	0,19	0,84	0,07	0,52	0,23
	a_2	0,01	0,01	-0,15	-0,83	0,06	0,03	-0,09
	a_3	-2,21	-9,10	1,11	-19,29	-5,00	-33,70	-10,13
Maio	a_1	0,01	0,52	0,23	0,84	0,07	0,52	0,36
	a_2	0,00	-0,11	-0,32	-0,83	0,06	0,03	-0,15
	a_3	-2,20	-11,34	-0,08	-19,29	-5,00	-33,70	-10,96
Junho	a_1	0,02	0,27	0,26	0,84	0,07	0,52	0,29
	a_2	-0,02	-0,18	-0,47	-0,83	0,06	0,03	-0,20
	a_3	-2,58	-26,40	-1,11	-19,29	-5,00	-33,70	-15,69
Julho	a_1	0,01	0,29	0,27	0,84	0,07	0,52	0,29
	a_2	-0,02	-0,21	-0,93	-0,83	0,06	0,03	-0,27
	a_3	-2,34	-27,15	-10,25	-19,29	-5,00	-33,70	-17,10
Agosto	a_1	0,03	0,29	0,27	0,84	0,07	0,52	0,30
	a_2	-0,06	-0,21	-0,77	-0,83	0,06	0,03	-0,25
	a_3	-5,02	-27,15	-11,34	-19,29	-5,00	-33,70	-17,64
Setembro	a_1	0,26	0,35	0,27	0,84	0,07	0,52	0,35
	a_2	-0,40	0,00	-0,41	-0,83	0,06	0,03	-0,19
	a_3	-3,67	-19,63	5,45	-19,29	-5,00	-33,70	-12,93
Outubro	a_1	0,03	0,33	0,32	0,84	0,07	0,52	0,32
	a_2	-0,02	-0,03	-0,08	-0,83	0,06	0,03	-0,10
	a_3	-6,65	-27,41	1,35	-19,29	-5,00	-33,70	-16,26
Novembro	a_1	0,02	0,24	0,28	0,84	0,07	0,52	0,28
	a_2	-0,01	0,00	0,01	-0,83	0,06	0,03	-0,08
	a_3	-3,56	-28,58	-1,77	-19,29	-5,00	-33,70	-16,58
Dezembro	a_1	0,02	0,21	0,26	0,84	0,07	0,52	0,27
	a_2	-0,04	-0,06	0,02	-0,83	0,06	0,03	-0,10
	a_3	-3,89	-25,23	-1,87	-19,29	-5,00	-33,70	-15,63
Média	a_1	0,04	0,26	0,27	0,84	0,07	0,52	0,29
	a_2	-0,05	-0,07	-0,28	-0,83	0,06	0,03	-0,14
	a_3	-3,30	-22,76	-1,58	-19,29	-5,00	-33,70	-14,76

1 Valores de RMSE na vegetação variaram de 1,40 (julho) a 8,66 $W m^{-2}$ (agosto).

2 Valores de RMSE no solo variaram de 1,43 (abril) a 21,37 $W m^{-2}$ (outubro).

3 Valores de RMSE no concreto variaram de 13,10 (junho) a 92,69 $W m^{-2}$ (abril)*.

* A grande variabilidade observada no mês de abril se deve ao processo de condensação observado no sítio neste período.

Tabela G – Fração de área e coeficientes ponderados a_1 , a_2 e a_3 para o entorno do Sítio 3 ao longo dos meses do ano.

Sítio	Fração	Vegetação ¹	Solo ²	Concreto ³	Asfalto	Telhado	Canion	Área Ativa
3	%	11,42	7,99	9,07	12,65	33,98	24,88	100,00
Mês	Coef.	Vegetação	Solo	Concreto	Asfalto	Telhado	Canion	Ponderado
Janeiro	a_1	0,01	0,18	0,10	0,84	0,07	0,52	0,32
	a_2	0,00	-0,04	-0,13	-0,83	0,06	0,03	-0,13
	a_3	-2,27	-25,57	-6,39	-19,29	-5,00	-33,70	-16,13
Fevereiro	a_1	0,01	0,21	0,09	0,84	0,07	0,52	0,33
	a_2	0,00	0,00	-0,14	-0,83	0,06	0,03	-0,13
	a_3	-2,34	-25,60	-7,64	-19,29	-5,00	-33,70	-16,21
Março	a_1	0,02	0,15	0,10	0,84	0,07	0,52	0,32
	a_2	0,00	0,01	-0,11	-0,83	0,06	0,03	-0,13
	a_3	-2,90	-19,94	-8,94	-19,29	-5,00	-33,70	-15,83
Abril	a_1	0,01	0,11	0,11	0,84	0,07	0,52	0,32
	a_2	0,01	0,01	-0,05	-0,83	0,06	0,03	-0,13
	a_3	-2,21	-9,10	-6,08	-19,29	-5,00	-33,70	-14,68
Maio	a_1	0,01	0,52	0,11	0,84	0,07	0,52	0,35
	a_2	0,00	-0,11	-0,25	-0,83	0,06	0,03	-0,15
	a_3	-2,20	-11,34	-6,13	-19,29	-5,00	-33,70	-14,87
Junho	a_1	0,02	0,27	0,12	0,84	0,07	0,52	0,33
	a_2	-0,02	-0,18	-0,27	-0,83	0,06	0,03	-0,16
	a_3	-2,58	-26,40	-5,09	-19,29	-5,00	-33,70	-16,14
Julho	a_1	0,01	0,29	0,12	0,84	0,07	0,52	0,34
	a_2	-0,02	-0,21	-0,25	-0,83	0,06	0,03	-0,16
	a_3	-2,34	-27,15	-5,01	-19,29	-5,00	-33,70	-16,19
Agosto	a_1	0,03	0,29	0,13	0,84	0,07	0,52	0,34
	a_2	-0,06	-0,21	-0,26	-0,83	0,06	0,03	-0,16
	a_3	-5,02	-27,15	-4,46	-19,29	-5,00	-33,70	-16,35
Setembro	a_1	0,26	0,35	0,11	0,84	0,07	0,52	0,36
	a_2	-0,40	0,00	-0,23	-0,83	0,06	0,03	-0,17
	a_3	-3,67	-19,63	-0,78	-19,29	-5,00	-33,70	-15,38
Outubro	a_1	0,03	0,33	0,09	0,84	0,07	0,52	0,34
	a_2	-0,02	-0,03	-0,18	-0,83	0,06	0,03	-0,14
	a_3	-6,65	-27,41	-2,39	-19,29	-5,00	-33,70	-16,36
Novembro	a_1	0,02	0,24	0,10	0,84	0,07	0,52	0,33
	a_2	-0,01	0,00	-0,15	-0,83	0,06	0,03	-0,13
	a_3	-3,56	-28,58	-4,02	-19,29	-5,00	-33,70	-16,34
Dezembro	a_1	0,02	0,21	0,09	0,84	0,07	0,52	0,33
	a_2	-0,04	-0,06	-0,16	-0,83	0,06	0,03	-0,14
	a_3	-3,89	-25,23	-5,08	-19,29	-5,00	-33,70	-16,14
Média	a_1	0,04	0,26	0,11	0,84	0,07	0,52	0,33
	a_2	-0,05	-0,07	-0,18	-0,83	0,06	0,03	-0,14
	a_3	-3,30	-22,76	-5,17	-19,29	-5,00	-33,70	-15,89

1 Valores de RMSE na vegetação variaram de 1,40 (julho) a 8,66 W m⁻² (agosto).

2 Valores de RMSE no solo variaram de 1,43 (abril) a 21,37 W m⁻² (outubro).

3 Valores de RMSE no concreto variaram de 7,55 (setembro) a 32,42 W m⁻² (abril).