

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO
NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**BALANÇO DE ENERGIA EM ÁREA URBANA NA CIDADE DO
RECIFE – PE**

IANE ANDRADE DE OLIVEIRA

Orientador: Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino

Co-orientador: Prof. Dr. José Romualdo de Sousa Lima

Recife, PE

Agosto /2012

IANE ANDRADE DE OLIVEIRA

**BALANÇO DE ENERGIA EM ÁREA URBANA NA CIDADE DO
RECIFE- PE**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares para obtenção do título de Doutor em Ciências, Área de Concentração: Aplicações de Radioisótopos na Agricultura e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino
Co-orientador: Prof. Dr. José Romualdo de Sousa Lima

Recife, PE
Agosto /2012

Catálogo na fonte
Bibliotecário Marcos Aurélio Soares da Silva, CRB-4 / 1175

O48b

Oliveira, Iane Andrade de.

Balanço de energia em área urbana na cidade do Recife-PE / Iane Andrade de Oliveira. - Recife: O Autor, 2012.
88 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Profº Drº. Antônio Celso Dantas Antonino.

Coorientador: Prof.º Dr.º José Romualdo de Sousa Lima.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2012.

Inclui Referências.

1. Energia Nuclear. 2. Clima Urbano. 3. Fluxos de Energia. 4. Temperatura do Ar. I. Antonino, Antônio Celso Dantas (Orientador). II. Título.

621.4837 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2013-203

BALANÇO DE ENERGIA EM ÁREA URBANA NA CIDADE DO RECIFE-PE

Iane Andrade de Oliveira

APROVADA EM: 15.08.2012

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. José Romualdo de Sousa Lima

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino – DEN/UFPE

Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – DEN/UFPE

Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura – PGEA/UFRPE

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva – PPGG/UFPE

Prof. Dr. Pabício Marcos Oliveira Lopes – PGEA/UFRPE

Visto e permitida a impressão

Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

Dedico às pessoas mais importantes da minha vida: meus pais, Ildete Alves de Oliveira Andrade e Joselmi Neca de Andrade e meu esposo Carlos Alexandre Barros de Almeida.

Ofereço aos meus irmãos
Fernando, Fernanda e Jeime.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado força e me iluminado, para superar os momentos difíceis.

Aos meus orientadores, professor Dr. Antonio Celso Dantas Antonino e professor Dr. José Romualdo de Sousa Lima, pela paciência, orientação e ensinamentos transmitidos.

A minha mãe Ildete, meu pai Joselmi, meus irmãos Fernando, Fernanda, por terem me dado força e compreendido minha ausência, também meu irmão Jeime e minha amiga Valderéz que me recebeu com todo carinho no início dessa caminhada.

Minha avó Odete e aos meus tios que são maravilhosos e sempre me deram força em todas as minhas caminhadas.

Ao meu esposo Carlos, que sempre teve muita paciência, me dando muitas alegrias e ajudando nos momentos mais difíceis, contribuindo para que me tornasse uma nova mulher. Também aos seus familiares que me acolheram com todo carinho.

Aos amigos do trabalho Cássio, Antonio Marques, Angelim, Edevaldo, Manuella, Cláudio, Fernanda, Edvane, Carol e Leidjane e todos que contribuíram de alguma maneira comigo.

As amigas irmãs Lindhiane e Danila pela amizade de sempre.

Aos professores Dr. Geber, Dr. Fabrício, Dr. Bernardo e Dr. Carlos Brayner pela contribuição para um melhor enriquecimento do trabalho.

A todos que de alguma forma contribuíram para essa conquista.

Muito Obrigado!!!

RESUMO

OLIVEIRA, I. A. de. **Balanço de Energia em área urbana na cidade de Recife-PE.** Tese (Doutorado). Departamento de Energia Nuclear. Universidade Federal de Pernambuco, 88p. 2012

A heterogeneidade do ambiente urbano resulta em diferentes graus de controle no particionamento de fluxos de energia entre a superfície e a atmosfera urbana e o desenvolvimento de microclimas locais em diversas escalas. O objetivo desta tese é analisar o comportamento dos componentes do balanço de energia para duas áreas: uma com cobertura de gramado e outra com cobertura asfáltica, em área urbana na cidade de Recife-PE. O sítio experimental foi instalado no Centro Regional de Ciências Nucleares, situado na Cidade Universitária na zona oeste da cidade de Recife - PE, onde foram instaladas duas torres micrometeorológicas com um pluviômetro, 2 radiômetros e sensores para medidas da temperatura e da umidade relativa do ar e da velocidade do vento, em 2 níveis acima do solo. Além desses sensores, foram instalados a 5 cm de profundidade no solo, fluxímetros para medir o fluxo de calor no solo, além de duas sondas de temperatura e umidade do solo. Essas medidas foram armazenadas a cada 30 minutos num datalogger. Os componentes do balanço de energia foram obtidos por meio do método da razão de bowen. Os resultados indicam que na área de gramado, o fluxo de calor sensível (H) é o termo dominante durante todo o período analisado, onde H corresponde a 49% do saldo de radiação, o fluxo de calor latente (LE) no período corresponde a 40% do saldo de radiação e o fluxo de calor no solo (G) corresponde a 11% do saldo de radiação. Para área de cobertura asfáltica a radiação global transformada em saldo de radiação foi de 77%, sendo que o saldo de radiação foi utilizado em média, como 51% no fluxo de calor sensível, 37% como fluxo de calor latente e 11% como o fluxo de calor no solo. Na cidade de Recife, o albedo teve valores de 17,9% no gramado e 11,6% no asfalto.

Palavras - Chave: Clima urbano, fluxos de energia, temperatura do ar

ABSTRACT

OLIVEIRA, I. A. de. The Energy Balance in urban area of the city of Recife-PE.
Thesis (Doctoral). Department of Nuclear Energy. Federal University of Pernambuco,
88p. 2012

The heterogeneity of the urban environment results in different degrees of control on the partitioning of energy fluxes between the surface and the urban atmosphere and the development of local microclimates at various scales. The main objective of this thesis is to analyze the behavior of the components of energy balance for two areas, one covered with grass and other cover with asphalt, in urban areas in the city of Recife. The experimental site was installed in the Regional Center of Nuclear Sciences, located in University City in the west of the city of Recife-PE, where two micrometeorological towers were installed with a rain gauge, two radiometer and sensors for measurement of temperature and relative humidity and wind speed at two levels above ground. In addition to these sensors were installed at 5 cm depth in the soil, flow meters to measure the heat flow in the soil, and two temperature probes and soil moisture. These measurements were stored every 30 minutes in a datalogger. The components of energy balance were obtained by the Bowen ratio method. The results indicate that the lawn area, the sensible heat flux (H) is the dominant term throughout the analysis period where H accounts for 49% of the net radiation, the latent heat flux (LE) during the period corresponds to 40% of the net radiation and heat flow in the ground (G) throughout the period corresponds to 11% of the net radiation. For coverage area asphalt transformed into the global radiation balance of radiation was 77%, and the net radiation was used on average as 51% in sensible heat flux, 37% as latent heat flux and 11% as flow of heat in the soil. In the city of Recife, albedo values were 17.9% and 11.6% on the lawn in the asphalt.

Keywords: Urban climate, energy fluxes, air temperature

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação esquemática da atmosfera urbana em escala local	18
Figura 2. Representação esquemática da atmosfera urbana em microescala	18
Figura 3. Representação esquemática da atmosfera urbana	21
Figura 4. Localização do município de Recife, Pernambuco	31
Figura 5. Localização do bairro Cidade Universitária em Recife-PE	32
Figura 6. Torre micrometeorológica instalada na área gramada	34
Figura 7. Torre micrometeorológica instalada na área com cobertura asfáltica	35
Figura 8. Temperatura e umidade relativa média do ar em área de gramado na cidade do Recife-PE, durante o período de 08/06/2010 a 31/07/2011	42
Figura 9. Precipitação em área de gramado na cidade do Recife, durante o período de 08/06/2010 a 31/07/2011	43
Figura 10. Normal climatológica de precipitação para Recife – PE, 1961-1990. Fonte INMET	44
Figura 11. Velocidade do vento em área de gramado na cidade do Recife, durante o período de 08/06/2010 a 31/07/2011	45
Figura 12. Evolução diária dos componentes do balanço de energia em área urbana (gramado), em Recife-PE, para o período de 08/06/2010 a 31/07/2011	46
Figura 13. Variação dos valores diários médios mensais dos fluxos de calor sensível e latente em área de gramado em Recife-PE durante o período de junho de 2010 a julho de 2011	47
Figura 14. Precipitação pluvial diária em Recife, para o mês de outubro (a) de 2010 e maio de 2011(b).	48
Figura 15. Temperatura máxima e mínima do ar para o mês de outubro de 2010 (a) e maio de 2011(b)..	49
Figura 16. Umidade relativa do ar máxima e mínima para o mês de outubro de 2010 (a) e maio de 2011(b), Recife	50
Figura 17. Evolução diária dos componentes do balanço de energia, em área urbana, em Recife-PE, para o mês de outubro de 2010 (a) e maio de 2011 (b).	52

Figura 18. Variação diária da razão entre o saldo de radiação e a radiação global, e entre o saldo de radiação e os fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G), em Recife no mês de outubro de 2010 (a) e maio de 2011 (b).	53
Figura 19. Evolução horária dos fluxos de energia em área urbana (gramado), Recife/PE	55
Figura 20. Componentes do balanço de radiação, para o período de 19 de abril a 26 de julho de 2011, em área gramada, Recife-PE.	57
Figura 21. Variação média diária do albedo, em área gramada, Recife-PE	58
Figura 22. Variação média horária dos componentes do balanço de radiação, em área de gramado, Recife-PE.	59
Figura 23. Temperatura média do ar e umidade de ar na cidade de Recife-PE, (asfalto) para o período 01/08/2010 a 31/03/2011.	61
Figura 24. Precipitação em área urbana na cidade de Recife para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011.	62
Figura 25. Velocidade do vento em área urbana na cidade de Recife para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011.	63
Figura 26. Variação diária da razão entre o saldo de radiação e a radiação global, e entre o saldo de radiação e os fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G), em Recife (asfalto) no período de 01/08/2010 a 31/03/2011	64
Figura 27. Evolução diária dos componentes do balanço de energia em área urbana (asfalto), em Recife-PE, para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011	65
Figura 28. Variação dos valores médios mensais dos fluxos de calor latente e sensível em Recife-PE (área coberta com asfalto) em 2010/2011	66
Figura 29. Evolução horária dos fluxos de energia em área urbana, Recife/PE (com cobertura de asfalto)	67
Figura 30. Componentes do balanço de radiação, para o período de 30/07/2011 a 01/11/2011, em área de asfalto, Recife-PE.	69
Figura 31. Variação média diária do albedo, em área de asfalto, Recife-PE.	70
Figura 32. Variação média horária dos componentes do balanço de radiação, em área de asfalto, Recife-PE.	71

Figura 33. Temperatura do ar diária em Recife, para uma área de gramado e área com cobertura asfáltica, para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011	73
Figura 34: Umidade relativa diária em Recife, para uma área de gramado e área com cobertura asfáltica, para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011	74
Figura 35. Relação entre o saldo de radiação (R_n) e a radiação solar global (R_g) para a área de gramado (a) e área de asfalto (b), no período de 01/08/2010 a 31/10/2010, em Recife-PE.	76
Figura 36. Comparação dos valores diários de R_n medido e estimado em função da R_g para o período seco nas áreas de gramado (a) e asfalto (b) em Recife-PE.	78
Figura 37. Comparação dos valores diários de R_n medido e estimado em função da R_g para o período úmido nas áreas de gramado (a) e asfalto (b) em Recife-PE.	79

LISTA DE SIGLAS

CLA	Camada Limite Atmosférica
CLU	Camada Limite Urbana
CLD	Camada Limite do Dossel Urbano
CLR	Camada Limite Rural
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
RPA	Regiões Político-Administrativas
SUDENE	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
ITEP	Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco
IFET	Instituto Federal de Pernambuco
CRCN	Centro Regional de Ciências Nucleares

LISTA DE SÍMBOLOS

z	Profundidade do solo
R_n	Saldo de radiação
LE	Fluxo de calor latente
H	Fluxo de calor sensível
G	Fluxo de calor no solo
β	Razão de Bowen
γ	Constante psicrométrica
ΔT	Diferença de temperatura do ar
Δe	Diferença de pressão de vapor d'água
e_s	Pressão de saturação de vapor
UR	Umidade relativa do ar
e	Pressão real de vapor
R_g	Radiação solar global
K_r	Radiação de ondas curtas refletida
L_i	Radiação de ondas longas da atmosfera
L_r	Radiação de ondas longas emitida pela superfície
K	Balanço de radiação de ondas curtas
L	Balanço de radiação de ondas longas
α	Albedo

Sumário

1. Introdução	15
2. Revisão de Literatura	17
2.1 Relações entre cidade e clima urbano	17
2.1.1 Clima Urbano	17
2.1.2 Escalas do Clima Urbano	18
2.2 Balanço de Radiação	21
2.2.1 Balanço de Ondas Curtas	23
2.2.2 Balanço de Ondas Longas	24
2.3. Balanço de Energia	25
2.3.1 Balanço de energia em superfícies urbanas	27
3. Materiais e Métodos	31
3.1 Localização e clima	31
3.2 Descrição da área experimental	32
3.2.1 Área experimental 01: área de gramado	33
3.2.2 Área experimental 02: área com cobertura asfáltica	35
3.3 Determinação do balanço de energia	36
3.4 Determinação do balanço de radiação	37
3.5 Estimativa do saldo de radiação usando a radiação solar global	38
4. Resultados e Discussão	41
4.1 Resultados para a área de gramado	41
4.1.1 Variáveis climáticas	41
4.1.2 Componentes do balanço de energia	45
4.1.3 Componentes do balanço de energia para períodos secos e úmidos	47
4.1.4 Componentes do balanço de radiação	57
4.2 Resultados para a área de asfalto	61
4.2.1 Variáveis climáticas	61
4.2.2 Componentes do balanço de energia	63
4.2.3 Componentes do balanço de radiação	69
4.3 Resultados para a área de gramado versus asfalto	73
4.3.1 Variáveis climáticas para a área de gramado versus asfalto	73

4.3.2 Análise dos fluxos de calor latente e calor sensível para o gramado e o asfalto	74
4.4 Análise estatística da estimativa do saldo de radiação para área de gramado e de asfalto	76
5. Conclusões.....	80
6. Bibliografia.....	81

1. Introdução

As cidades hoje abrigam a maioria da população mundial, sendo que o processo de urbanização delas acarreta alterações na atmosfera urbana, direta ou indiretamente. Particularmente no Brasil, as cidades têm crescido quase sem nenhum controle ou planejamento urbano, superando a capacidade dos governos locais em prover adequada infraestrutura, habitação e qualidade de vida.

A urbanização provoca profundas alterações no ambiente local, por exemplo, a redução da vegetação altera o equilíbrio de água, o baixo albedo das superfícies urbanas aumenta a absorção da radiação solar durante o dia. Esse calor adicional armazenado nos edifícios aumenta a temperatura ambiente, aumenta a produção flutuante de turbulência, e reduz o resfriamento noturno. Estas alterações climáticas afetam a produção e características químicas de gases poluentes e partículas, causando mudanças no conforto fisiológico dos seres humanos, aumenta o risco à saúde pública, modifica os requisitos de refrigeração e de aquecimento, e perturbam os padrões climáticos com o aumento da cobertura de nuvens, precipitação e nevoeiro (Velasco et al., 2010).

A urbanização acelerada e quase sempre desordenada levou a substituição de superfícies naturais por superfícies pavimentadas e construções, que devido às propriedades térmicas dessas novas superfícies, elas modificam os balanços de radiação e de energia nas áreas urbanas.

A heterogeneidade do ambiente urbano resulta em diferentes graus de controle no particionamento de fluxo entre a superfície e a atmosfera urbana e o desenvolvimento de microclimas locais em diversas escalas. Assim, o reconhecimento destes tem motivado pesquisas para compreender a variabilidade espacial e temporal das trocas de fluxos energéticos dentro da superfície e atmosfera e entre os usos de solo e as causas para essas diferenças (Balogun et al., 2009).

O desenvolvimento de pesquisas sobre o balanço de energia em áreas urbanas permitirá a determinação de parâmetros como a taxa de evapotranspiração da superfície, da razão de Bowen, nos processos de trocas de energia na superfície da região urbana das cidades. Esses dados podem ser utilizados como referência para direcionar ações de gerenciamento e de planejamento ambiental nas cidades.

O principal objetivo desta tese é analisar o comportamento dos componentes do balanço de energia para duas áreas urbanas na cidade de Recife - PE, com diferentes coberturas de solo (área de gramado e área com cobertura asfáltica).

Os objetivos específicos incluem:

- Analisar a variação sazonal do balanço de radiação de ondas curtas e de ondas longas, e consequentemente, o saldo de radiação, nas áreas de gramado e de cobertura asfáltica;
- Estimar o saldo de radiação, para as duas áreas, por meio de medidas da radiação solar global;
- Estimar os fluxos de calor latente e calor sensível pelo método da razão de Bowen para as áreas de gramado e de cobertura asfáltica;
- Avaliar a variação sazonal da partição dos componentes do balanço de energia para as áreas urbanas de gramado e de cobertura asfáltica.

2. Revisão de Literatura

2.1 Relações entre cidade e clima urbano

2.1.1 Clima Urbano

O clima urbano é uma modificação substancial de um clima local, resultado de condições particulares do meio ambiente na cidade, seja pela rugosidade, pela sua ocupação, permeabilidade ou pelas propriedades térmicas dos materiais que o compõem (Oke, 2005).

O processo de urbanização das cidades acarreta alterações na atmosfera local que, direta ou indiretamente, favorecem a formação de microclimas em diferentes localidades da cidade. A substituição de superfícies naturais por superfícies pavimentadas e construções, resultado da urbanização acelerada e quase sempre desordenada, modifica o balanço de energia (Ugeda Júnior e Amorim, 2011).

Os efeitos da formação desse clima urbano são devidos à diferença das trocas de calor, massa e momentum entre a cidade e sua paisagem. Assim a percepção, previsão e atenuação dos efeitos do clima urbano estão intimamente ligadas ao conhecimento das interações superfície-atmosfera em ambientes urbanos, bem como o particionamento dos fluxos entre essas interações (Balogun et al., 2009).

Geralmente, as cidades são mais aquecidas e menos ventiladas que as áreas rurais. Porém, as modificações do clima urbano são altamente variáveis, ou seja, as variações climáticas no ambiente urbano não ocorrem de forma homogênea, assim como não são homogêneas as tipologias de ocupação e uso do solo nas cidades. Ao analisar as diferenças climáticas entre o centro urbano de uma cidade e seu entorno, trabalha-se em uma escala diferente do que na análise da influência de um conjunto de edifícios, em um determinado bairro da cidade (Cox, 2008).

Como o clima é resultado da interrelação de um conjunto de elementos meteorológicos predominantes em determinada região, cuja periodicidade é marcante, seu estudo, nas diversas localidades do planeta, é de fundamental importância, visto que os aspectos climáticos influenciam o homem de diversas maneiras, assim como o homem influencia o clima através do desenvolvimento de várias atividades necessárias à sua sobrevivência. Até recentemente, a ênfase maior residia no controle que o clima exercia sobre o homem e suas atividades. Com o aumento populacional e o aumento das capacidades tecnológico-científicas da humanidade, percebeu-se que o homem pode influenciar e de fato tem influenciado o clima, apesar de essa ação ser feita principalmente numa escala local (Abreu et al., 2007).

2.1.2 Escalas do clima urbano

As alterações climáticas podem ser observadas em diferentes escalas (distância horizontal) e limites da camada atmosférica (distância vertical). A classificação de escalas climáticas possibilita o maior entendimento e desenvolvimento de métodos adequados de diagnósticos do clima (Cox, 2008).

As escalas climáticas urbanas (distância horizontal) podem ser classificadas, de acordo com Oke (2004), em escala macroclimática, escala mesoclimática, escala local (Figura 1) e escala microclimática (Figura 2), as quais são ilustradas abaixo, de acordo com Oke (1974; 2006).

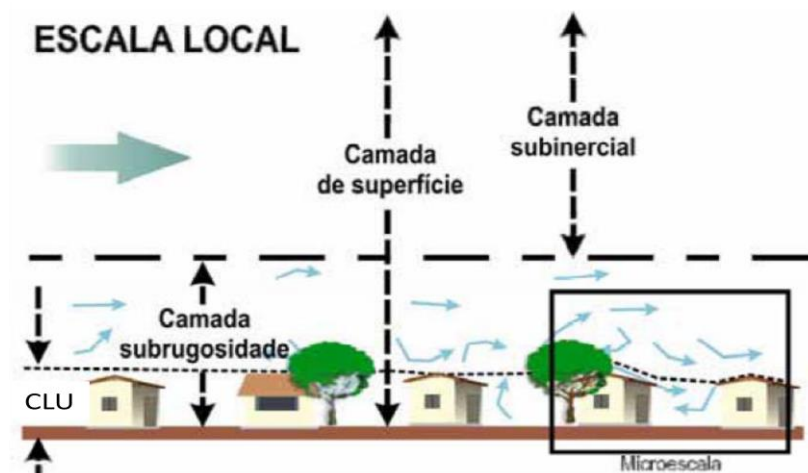


Figura 1. Representação esquemática da atmosfera urbana em escala local (Adaptado de Oke, 2006)

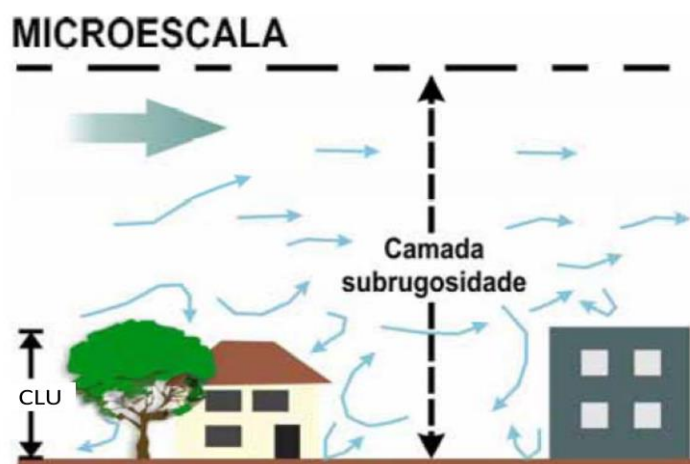


Figura 2. Representação esquemática da atmosfera urbana em microescala (Adaptado de Oke, 2006)

A escala macroclimática equivale ao clima regional. Este clima é decorrente, sobretudo, da formação topográfica e da latitude. Recebe influência das massas térmicas, que, além de suas características originais, durante sua trajetória recebem influência de outras massas térmicas e do mar. Na escala mesoclimática é possível observar a influência da cidade no tempo e no clima de toda área urbana. Costuma-se adotar médias de 30 anos de dados climáticos comparadas com parâmetros da evolução urbana. Normalmente, estes dados são fornecidos por estações meteorológicas ou aeroportos localizados no perímetro urbano (Oke, 2004).

A escala local inclui os efeitos da característica das paisagens no clima, tal qual a topografia, porém exclui os efeitos do microclima. Nas cidades isso corresponde ao impacto de vizinhanças com tipos similares de desenvolvimento urbano (cobertura da superfície, tamanho e espaçamento das construções e atividade). Essa escala é adotada quando se tem dimensões maiores que um quilômetro. Nessa classificação de escala, utilizam-se dados diários e horários coletados durante um período de tempo que pode variar de cerca de um ano, um trimestre ou mesmo por um episódio típico de verão ou de inverno. Tais dados costumam ser coletados pelo próprio pesquisador.

A escala microclimática equivale à camada mais próxima do solo. É típica para microclimas urbanos, sendo ajustadas pelo dimensionamento de elementos individuais: prédios, árvores, estradas, ruas, pátios, jardins, etc., estendendo-se, em média, por menos de um metro até cem metros. Assim como na escala local, os dados são, também, coletados pelo próprio pesquisador dentro de um período de tempo que pode variar de cerca de um ano, um trimestre ou mesmo por um episódio típico de verão ou de inverno (Oke, 1974).

Na classificação das camadas que compõem a atmosfera com relação à distância vertical do clima urbano (Camada Limite Atmosférica), Oke (2005) observou que correntes de ar vindas das áreas rurais, ao chegarem à cidade, encontram uma atmosfera diferenciada e estratificada com características próprias.

A Camada Limite Atmosférica (CLA) é a camada que corresponde aos baixos níveis da troposfera, camada de mistura ou turbulência, gerada pela fricção entre o ar e a superfície terrestre e pela convecção de parcelas do ar aquecidas pela superfície. A altura dessa camada varia conforme a influência dos processos de mistura gerados na superfície e pode, sobre a cidade, atingir várias centenas de metros, formando-se a conhecida cúpula de contaminação (Nunez e Oke, 1977).

A estrutura da CLA pode variar muito em função da superfície abaixo dela. O comportamento da CLA sobre uma superfície urbana é importante no estudo dos fluxos de energia em área urbana. Atualmente grande parte da população do Brasil (80%) e também do mundo (50%) vivem em cidades, o que torna o estudo da camada limite urbana (CLU) de grande importância (Freitas, 2003; Marciotto et al., 2010).

De acordo com Oke (2005), a camada limite é a parte da atmosfera que é diretamente influenciada pela superfície e, sobre as cidades, é chamada de Camada Limite Urbana (CLU) e é influenciada pela rugosidade da superfície, turbulência térmica e mecânica, produção antrópica de calor e pelo armazenamento de calor pelas estruturas físicas urbanas. Assim, a Camada Limite Atmosférica se divide conforme as alterações do clima, devido aos efeitos da urbanização e da indústria, nos seguintes espaços: Camada Limite do Dossel Urbano ou Urban Canopy Layer (CLD) – abrange a extensão do solo até a altura média dos edifícios do recinto urbano, produzida pelos processos em microescala localizados nas ruas e entre os prédios. A natureza ativa dessa superfície produz uma considerável complexidade de fatores atuantes. Camada Limite Urbana ou Urban Boundary Layer (CLU) - Estende-se acima do nível dos telhados. É um fenômeno localizado, com características produzidas pela natureza da superfície urbana cuja rugosidade proporcionada pela presença de prédios relativamente altos, provoca uma aerodinâmica particular. A velocidade do vento se reduz, mas ocorre um aumento da turbulência e do arrasto produzidos pela fricção do ar.

A representação esquemática da atmosfera urbana (Figura 3) está dividida em camada limite da influência urbana (CLU); camada limite do dossel urbano (CLD) e camada limite rural (CLR). A camada limite urbana é um fenômeno de escala mesoclimática cujas características são determinadas parcialmente pela presença da malha urbana, a camada de cobertura urbana é governada por processos de microescala, presentes nos canyons entre as edificações (Oke, 2004).

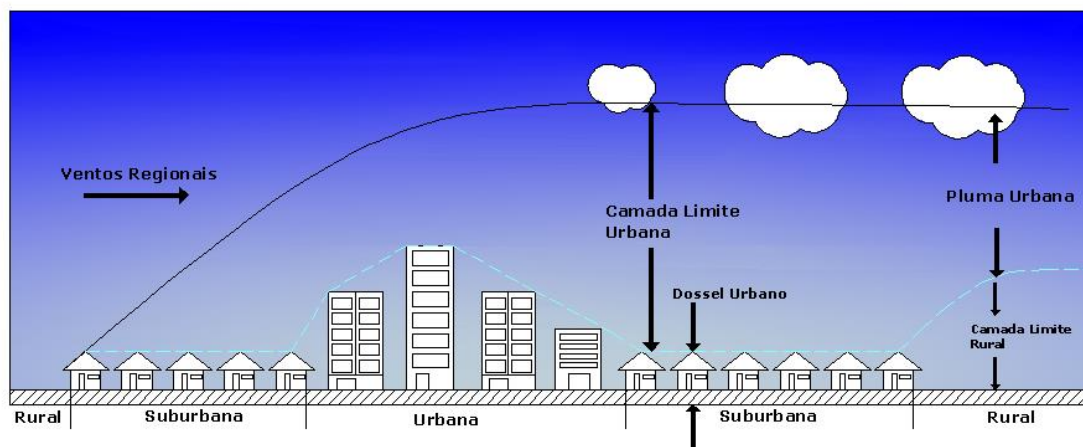


Figura 3. Representação esquemática da atmosfera urbana (Adaptada de Oke, 2006).

Outro efeito dos centros urbanos sobre a CLU é devido à produção antropogênica de calor. Dessa forma, a geometria da superfície urbana e a atividade humana afetam diretamente os fluxos do momento, do calor e da umidade próximos à superfície, na camada do dossel urbano. A CLU forma-se na direção do vento envolvendo toda a estrutura da cidade, como uma redoma cuja altura depende da rugosidade da superfície e da estabilidade atmosférica, sendo o fluxo de ar fortemente modificado pela geometria dos edifícios. Assim, a direção e a velocidade do vento são alteradas, o que pode causar dificuldade na dispersão de poluentes nas grandes cidades (Freitas, 2003).

2.2 Balanço de Radiação

A radiação solar é a radiação eletromagnética que incide na terra proveniente do Sol. Essa radiação é de grande importância para vida na Terra e é responsável pela maioria dos processos biológicos e fisiológicos dos vegetais, e sendo também responsável direto da disposição da energia disponível para os processos superfície – atmosfera. Quando a radiação solar incide sobre uma superfície urbana, parte dela é absorvida pelo dossel, e eventualmente pelo solo, parte é refletida para a atmosfera, e outra parte é transportada para atmosfera pelos processos energéticos de trocas turbulentas que envolvem o dossel e a atmosfera (Correia, 2000).

O balanço de radiação para uma determinada superfície corresponde à soma de toda energia radiante recebida e perdida. No entanto, depende de fatores químicos e

físicos associados ao sistema superfície-atmosfera como: elementos de rugosidade, albedo de superfície, capacidade térmica, condutividade térmica, emissividade da superfície e da atmosfera e transmissividade atmosférica (Oke, 2005).

O albedo é um parâmetro muito importante no balanço de radiação de uma superfície e bastante utilizado em modelos climáticos e agrometeorológicos, tais como estimativas do fluxo de vapor d'água e do saldo de radiação, dentre outros (Leitão et al., 2002). O albedo de uma superfície varia com o ângulo de elevação do Sol, tipo de cobertura, condições de umidade do ar e da superfície, umidade e tipo de solo, além da quantidade e do tipo de nuvens (Leitão, 1994; Ayoade, 2007; Oke, 2005).

O albedo nas áreas urbanas apresenta grande variação devido à grande diversidade dos materiais utilizados nas construções e da grande variação que existe nos tipos de superfícies criadas artificialmente, particularmente no caso dos telhados e das superfícies impermeabilizadas. Essas variações de albedo interferem no clima local (Oke, 2004).

Os diferentes albedos das superfícies explicam, em parte as variações do balanço de energia em diversas áreas e entre elas, como pode ser observado na tabela 01, a qual apresenta o albedo de algumas superfícies, segundo Ayoade (2007).

Tabela 01. Albedo de vários tipos de superfície

Superfície	Albedo (%)
Solo negro e seco	14
Solo negro e úmido	8
Solos nu	7 – 20
Areia	15 – 25
Florestas	3 – 10
Gramados	15 – 30
Cidades	14 – 18

Fonte: Ayoade (2007)

O albedo da superfície em regiões urbanas geralmente é menor devido ao efeito dos materiais que compõem o ambiente urbano e ao efeito geométrico, que aprisiona mais radiação solar devido ao aumento da verticalidade do dossel urbano em relação às superfícies cobertas por materiais naturais (Ferreira et al, 2012)

As superfícies urbanas absorvem e retêm mais energia do que as superfícies rurais ou naturalmente vegetadas, porque os efeitos combinados da geometria e dos materiais presentes no dossel urbano tornam o albedo e a capacidade térmica menores, e a condutividade térmica maior do que nas superfícies rurais (Landsberg, 1981)

Os estudos iniciados por Oke (2005) verificaram que o saldo de radiação na superfície urbana tende a variar pouco em relação a uma área rural. As razões são as seguintes: o decréscimo na radiação de ondas curtas incidente é parcialmente compensado pelo albedo reduzido da superfície urbana, implicando em radiação de onda curta refletida menor. A radiação de onda longa incidente tende a aumentar com o aumento da emissividade atmosférica e a radiação de ondas longas refletida pela superfície aumenta, provocada pelo aumento da temperatura de superfície (Arnfield, 2003).

O balanço de radiação na superfície da cidade é afetado por todos os seus componentes. A radiação de onda curta incidente nas áreas urbanas é alterada consideravelmente quando passa através da poluição atmosférica. A atenuação da radiação incidente depende da natureza e da quantidade de poluentes. Quanto maior a industrialização e a emissão de poluentes, maior a diminuição dessa radiação (Cardoso, 2010).

Ferreira (2010), estudando o balanço de energia na cidade de São Paulo observou que a variação diurna dos valores horários médios do saldo de radiação na superfície é 37% maior em fevereiro do que em agosto, e a amplitude da variação sazonal dos valores diários médios do saldo de radiação na superfície é de 60%, com um máximo em dezembro e um mínimo em junho.

Nas áreas abertas a radiação de onda curta e a radiação emitida pela superfície (onda longa) tendem a não encontrar obstáculos para, a partir da superfície, seguirem em sentido a atmosfera. Nas áreas construídas e em especial nas cidades, dependendo da distância, altura das casas, prédios, muros e outros, a radiação é liberada mais lentamente para a atmosfera e parte dela nem chega a ser liberada, o que proporciona o aumento da temperatura no centro das áreas urbanas (Oke, 2005).

2.2.1 Balanço de Ondas Curtas

A radiação proveniente do Sol tem a maioria de sua energia contida em comprimentos de onda que vão de 0,1 a 4 μm , correspondendo às bandas do ultravioleta, visível e infravermelho próximo (Brutsaert, 1982), sendo também denominada radiação de ondas curtas.

Ao atravessar a atmosfera, a radiação de ondas curtas é modificada pelo espalhamento, absorção e reflexão pelos diferentes tipos de moléculas e partículas presentes na atmosfera; portanto, a radiação solar global que alcança a superfície é constituída pela radiação solar difusa e direta.

De acordo com Moura (2001), maior parte da radiação que chega na superfície terrestre é denominada de radiação direta, quando a atmosfera não oferece obstáculo à passagem da radiação. Outra parte que alcança a superfície terrestre após ser refletida por nuvens e sofrer o processo de espalhamento por partículas atmosféricas e aerossóis é definida como radiação difusa. Estes dois fluxos de radiação alcançam a superfície concomitantemente e representam o total de radiação solar que atinge a superfície, o que é denominado de radiação solar global.

Ferreira (2010), em estudo de balanço de energia na cidade de São Paulo, observou que a variação sazonal dos valores diários médios mensais da radiação solar incidente na superfície é de 45% com um máximo em setembro e um mínimo em maio. O valor máximo em setembro é causado possivelmente pela redução da umidade e nebulosidade. O mínimo observado em maio ocorre devido ao aumento da nebulosidade, indicado por um aumento da precipitação acima da média no período.

2.2.2 Balanço de Ondas Longas

A radiação de ondas longas é o fluxo radiante de energia resultante da emissão dos gases atmosféricos e de superfícies líquidas e sólidas da Terra. Todos os materiais sobre a Terra possuem uma temperatura mais baixa que a do Sol, tal que a radiação que eles emitem tem comprimentos de ondas maiores que a da radiação solar global. A maior parte da radiação emitida pela Terra e pela atmosfera está contida no intervalo de 4 a 100 μm , por isto recebe a denominação de radiação de ondas longas (Vilani et al., 2010).

O balanço de ondas longas à superfície compreende duas componentes: a radiação atmosférica incidente e a radiação emitida. A primeira é função, basicamente, da temperatura do ar, da quantidade de vapor d'água presente na atmosfera e da cobertura de nuvens (Giongo, 2008). Enquanto que o fluxo de radiação de onda longa emitido pela superfície resulta principalmente da capacidade da superfície em emitir radiação, sendo proporcional à quarta potência da temperatura absoluta da superfície. O fluxo de radiação de ondas longas proveniente da atmosfera é uma importante

componente da troca radiativa no nível da superfície, e esta, por sua vez, é uma importante componente do balanço de energia (Liberato e Cardoso, 2010).

Na cidade de São Paulo, em 2004, os valores diários médios da radiação de ondas longas emitida pela atmosfera na superfície mostram uma variação sazonal de 13% com um máximo em janeiro e um mínimo em julho. Este comportamento está associado ao ciclo anual da temperatura, umidade do ar e nebulosidade (Ferreira, 2010).

A radiação solar refletida na superfície depende da radiação solar incidente e do albedo efetivo da superfície. Na maioria das regiões urbanas a intensidade da radiação solar refletida pela superfície é menor do que em regiões rurais adjacentes, causando um aumento na retenção da energia no dossel urbano em relação às regiões rurais adjacentes (Christen e Vogt, 2004).

2.3. Balanço de Energia

O balanço de energia da superfície urbana é essencial para a compreensão do desenvolvimento do clima urbano e os processos da camada limite. A temperatura da superfície é determinada pelo balanço de energia em superfície, e está relacionada de maneira fundamental para cada um dos seus fluxos componentes (Krayenhoff e Voogt, 2007).

Uma descrição clara do balanço de energia de superfície fornece um quadro para a compreensão da maioria dos processos químicos e físicos que ocorrem na atmosfera. Por exemplo, a evolução da camada limite é dependente da forma como toda a radiação ao atingir a superfície é dividida entre os diferentes fluxos de calor. Em ambientes urbanos, estruturas urbanas, a cobertura da terra e atividades antrópicas tem efeito significativo no balanço de energia e, por sua vez, sobre os parâmetros meteorológicos (Velasco et al., 2010).

De acordo com Wood et al. (2010), o esforço para estudar micrometeorologia urbana tem aumentado nos últimos anos, uma vez que é essencial para compreender o fluxo e as características da turbulência nas áreas urbanas, a fim de fornecer melhores previsões para o conforto térmico e exposição humana a substâncias perigosas.

O conhecimento do balanço de energia é de fundamental importância para o entendimento dos processos que ocorrem na camada limite. Em conjunto com o vento, esse balanço determina as forças envolvidas nos fluxos verticais de calor, massa e momento. O balanço de energia em superfície é um requisito básico para o entendimento de aspectos tais como: comportamento termodinâmico do ar, temperatura

e umidade na superfície, dinâmica do escoamento local e evolução da camada limite urbana (Freitas, 2003).

Na superfície da terra o saldo de radiação é utilizado nos processos de evaporação, de aquecimento do ar, do solo, das plantas e de fotossíntese (Fontana et al., 1991). O estudo do balanço de energia sobre superfícies tem grande importância em estudos de trocas de energia e de massa na camada limite superficial e, por conseguinte, em estudos de modificações no clima urbano, de modelagem numérica e de estimativas evaporativas e evapotranspirativas.

O método do balanço de energia é utilizado, comumente, para se estimar a evapotranspiração de superfícies e se baseia na análise do balanço energético dos ganhos e perdas de energia térmica radiativa, condutiva e convectiva por uma superfície evaporante (Borges et al., 2008). Ele permite um melhor conhecimento do clima urbano e é representado satisfatoriamente por fluxos de energia através de um volume solo-construções-ar.

O fluxo de calor armazenado na superfície urbana corresponde à energia absorvida ou liberada (por unidade de área e de tempo) devido às trocas de calor sensível (através da condução e da convecção) no interior do dossel urbano, envolvendo os edifícios, a vegetação e o solo. No dossel urbano o fluxo de calor armazenado é muito maior do que nas superfícies rurais adjacentes, porque geralmente os elementos que compõem as superfícies urbanas (telha, concreto, asfalto, etc.) apresentam em média capacidade e a condutividade térmica maior do que os elementos que compõem as superfícies não-urbanas (solo, vegetação rasteira, floresta, etc.) (Oke, 1982; Roberts et al., 2006).

No período noturno, a liberação do fluxo de calor armazenado no dossel urbano é a principal fonte de energia disponível, contribuindo para a emissão de radiação de ondas longas da superfície para a atmosfera, mantendo a evaporação (Ferreira, 2010).

O conhecimento sobre a troca de energia em forma de calor e evapotranspiração em uma área urbana, ocorre devido à determinação dos valores absolutos dos fluxos de calor sensível e calor latente, sendo necessário também saber a razão entre eles e sua soma. O valor da soma de energia a ser repartida entre calor sensível e latente depende da energia total recebida pelo sistema urbano. A energia disponível para troca de calor e para evapotranspiração é definida como a diferença da energia recebida menos a energia utilizada e armazenada (Oke, 2005).

Alves e Specian (2010) afirmam que o fluxo de calor sensível é mais importante nas cidades, sendo nestas alimentado pelo calor antropogênico e pela maior participação da superfície urbana nos processos de ondas longas. O calor antropogênico urbano oriundo da energia desprendida de diversos processos urbanos e industriais provoca alterações nas condições meteorológicas e, conseqüentemente, no clima.

2.3.1 Balanço de energia em superfícies urbanas

Uma das maiores dificuldades na formulação e avaliação do balanço de energia na superfície para regiões urbanas é a própria definição de superfície. Nas regiões urbanas a grande diversidade de tamanhos, formas, composição e organização dos elementos do dossel urbano, tornam muito difíceis a determinação de uma informação de superfície para fins meteorológicos. É sempre possível identificar uma superfície urbana para elementos individuais (ruas, telhados, topo das árvores), porém, a definição de superfície para grandes áreas ou de uma cidade como um todo é bastante complexa. Na maioria dos experimentos realizados em áreas urbanas busca-se uma região que tenha certa homogeneidade horizontal, de maneira a possibilitar a obtenção de medidas (Freitas, 2003).

Variações nas características da superfície urbana alteraram o clima local, mediante modificação do equilíbrio de energia entre a superfície e a camada limite, levando a distintos microclimas (Offerle et al., 2005)

O balanço de energia apresenta valores diferenciados de acordo com os vários padrões de uso do solo na cidade. Quando se consideram o fluxo de calor latente e o fluxo de calor sensível, as áreas mais edificadas ou industrializadas por apresentarem baixa evapotranspiração e baixo albedo, tendem a ter maior participação na emissão de radiação de ondas longas, induzindo a uma elevação da temperatura do ar nesses locais (Danni-Oliveira, 1995).

A influência do ambiente construído pode ser observada na maior absorção de energia de ondas curtas por materiais característicos do ambiente urbano como asfalto, concreto, entre outros. Quando parte desta energia é liberada para a atmosfera, uma fração dela é impedida por construções próximas ou outras barreiras. De acordo com Maitelli (2009) medidas diretas de calor armazenado em toda cidade são difíceis de fazer. Pode-se instalar fluxímetros em vários tipos de superfícies urbanas e obter dados sobre as trocas de calor destas superfícies, mas estas informações não seriam suficientes para se conhecer a orientação do tecido urbano. Esta energia só encontrará a atmosfera

quando não houver mais nenhum obstáculo, provocando assim, um resfriamento mais lento das áreas densamente construídas e mais urbanizadas. Os locais adjacentes à cidade, denominados de entorno rural, possuem um albedo maior do que a cidade, o que promove uma maior eficiência na perda de energia (Leão, 2008).

A grande complexidade observada no dossel urbano impede estimativas diretas do fluxo de calor armazenado. Portanto, todos os métodos disponíveis para estimar o fluxo de calor armazenado no dossel urbano são indiretos. Na literatura existem basicamente três maneiras para estimar indiretamente o fluxo de calor armazenado no dossel urbano: o método do resíduo, baseado na equação do balanço de energia na superfície; modelos empíricos, baseados nas relações empíricas entre o fluxo de calor armazenado e a radiação líquida na superfície; e a modelagem numérica, baseada na solução numérica da equação do fluxo de calor num elemento de volume que compõe o dossel urbano (Ferreira, 2010).

Para Grimmond e Oke (1999) o conhecimento do calor armazenado faz-se necessário em uma variedade de aplicações, como por exemplo, para modelos de evapotranspiração, calor sensível, desenvolvimento da camada limite e outros. Além disso, a inércia térmica fornecida por este termo de armazenamento é frequentemente considerado como um processo essencial na formação de ilhas de calor urbano. Dadas as matérias e morfologias do espaço urbano, é amplamente reconhecido que o calor armazenado será mais significativo do que em locais onde possuem simplesmente solo nu ou agrícola. No entanto, o fluxo de calor é de difícil medida, devido à complexidade da estrutura do espaço urbano e da diversidade de tipos de material de que a interface urbana é composta.

O dossel urbano se distingue do rural em vários aspectos: devido aos obstáculos rígidos, na resposta às forçantes radiativas, relacionada à geometria do dossel e à constituição dos materiais, no balanço de energia, que depende da permeabilidade do solo, capacidade e difusividade térmica dos materiais e disponibilidade de água (Marciotto, 2008).

As mudanças impostas ao comportamento dos elementos atmosféricos, comandadas pelas modificações na natureza das superfícies ocupadas pelas cidades, interferem no balanço de radiação, estoque de calor, umidade, circulação do ar e emissão de poluentes. Entre outros fatores, tais características devem-se às mudanças nas propriedades de albedo, condução e emissividade dos materiais empregados na construção civil, ou até mesmo obstrução de certa porcentagem da radiação solar pelos

altos edifícios. Este, também, relacionado ao incremento da “rugosidade” da superfície e o aumento da turbulência do ar. A diminuição da umidade do ar dever-se-ia à supressão de áreas verdes e superfícies líquidas, com a drenagem de pântanos e a canalização de rios e córregos. A emissão de poluentes atmosféricos relaciona-se à queima de combustíveis fósseis, atribuída principalmente a imensas frotas de veículos e concentração de atividades industriais (Jardim, 2007).

Para Xavier et al. (2009) na cidade pode se observar que a camada de ar mais próxima ao solo é mais aquecida nas cidades do que nas áreas rurais. Assim, a área urbana tem formas complexas como prédios e ruas, que alteram tanto a quantidade de calor absorvido pela região como a direção e a velocidade dos ventos.

Vários estudos sobre balanço de energia têm sido realizados em áreas urbanas o que permitem uma detalhada análise dos fluxos de energias urbana e permite comparações entre condições existentes e futuras (Grimmond e Oke, 2002; Arnfield, 2003; Offerle et al., 2005; Tejeda-Martinez e Jauregui-Ostos, 2005; Best et al., 2006; Maitelli, 2009; Kawai e Kanda, 2010). Ferreira (2010) observou os fluxos de energia diurna para cidade de São Paulo com dados observados em plataforma micrometeorológica e percebeu que as frações relativas dos componentes do balanço de radiação na cidade são comparáveis aos valores de outras regiões urbanas.

Oke et al. (1999), Grimmond e Oke (2002) realizaram medições do balanço de energia na Cidade do México, na estação seca, em uma área densamente construída. Os resultados mostraram um ambiente dominado pelo calor sensível, e em particular que armazena grandes quantidades de calor no espaço construído durante o dia, liberando-o durante a noite.

Nunez e Oke (1977) investigaram as trocas de energia que ocorrem num canyon urbano (microclima dentro da camada intra-urbana), com uma metodologia envolvendo medidas de campo em Vancouver, Canadá, no verão. Constataram no período diurno um balanço de energia relativamente suave, com o excedente dissipado pelas trocas turbulentas de calor, restando 20-30% armazenado nos materiais. À noite, em contrapartida, observaram o déficit de radiação quase inteiramente balanceado pela liberação de calor armazenado nas superfícies e em ambiente térmico ao redor.

Barbirato (2009), ao analisar modelos de balanço de energia e sua aplicação no planejamento urbano da cidade de Maceió-Al, observaram que as massas edificadas, produziram, claramente, efeitos de elevação de calor da temperatura interna da cidade. Os valores obtidos pelas curvas de evolução da temperatura mostraram pequenas

variações entre as diversas frações urbanas, devido aos efeitos amenizadores da umidade atmosférica, mas que reforçam a influencia, nas condições microclimáticas, de modificações no ambiente externo pela maior ou menor presença de superfícies, como edificações.

Para Maitelli (2009), estudando o balanço de energia para cidade de Cuiabá, Mato Grosso, os principais resultados evidenciaram que, em geral, os fluxos de calor sensível predominavam sobre os fluxos de calor latente e o fluxo de calor sensível somando ao fluxo de calor armazenado no tecido urbano foi, em média, 62% do saldo de radiação disponível para o sistema.

Segundo Ferreira (2010) os valores horários médios mensais do fluxo turbulento de calor latente correspondem a uma parcela relativamente pequena da energia total disponível durante o período diurno e também no período de 24 horas. Este comportamento confirma a baixa presença de áreas verdes e a grande taxa de impermeabilização do solo da região urbana de São Paulo.

3. Materiais e Métodos

3.1 Localização e clima

O trabalho foi desenvolvido na cidade de Recife (Figura 4), a qual está inserida entre as coordenadas geográficas 8° 04' 03" de latitude sul e 34° 55' 00" de longitude oeste, com altitude média de 4 m. Segundo dados fornecidos pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), em 2010 a cidade possuía uma população estimada em 1.472.202 habitantes, ocupando uma área de 219.493 km².

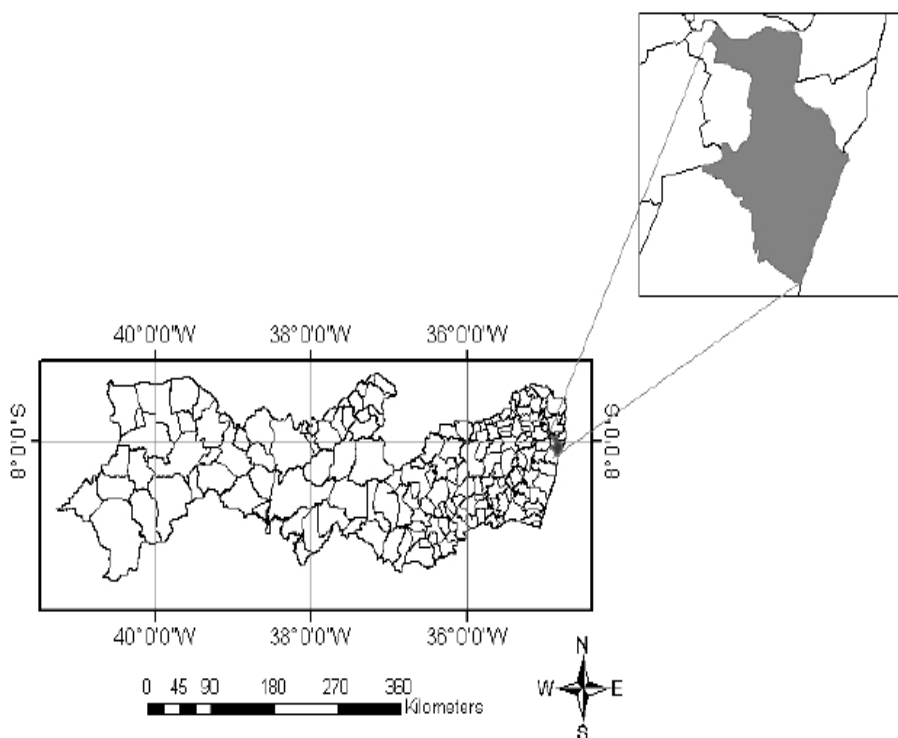


Figura 4. Localização do Município de Recife, Pernambuco.

O município de Recife é dividido geograficamente em seis Regiões Político-Administrativas – RPA's. Estas seguem uma lógica de subprefeituras. A primeira abrange o centro, as outras seguem as subsequentes zonas norte, noroeste, leste, sudoeste e sul (Atlas Municipal de Recife, 2005).

O clima local de acordo com Koppen é As' – quente e úmido, de forte influência oceânica, com médias térmicas mensais chegando a 25°C, sendo a umidade relativa do ar de 80%. As precipitações são de outono-inverno, com uma média pluviométrica de 2.000 mm/ano, sendo que o período que apresenta maior precipitação vai de março a agosto, com valor máximo em julho. O período de estiagem vai de setembro a fevereiro, no qual ocorre registros de precipitação, porém sem grande intensidade.

3.2 Descrição da área experimental

A escala climática urbana utilizada na realização desse estudo é classificada como microclima (horizontal) e camada limite do dossel urbano (vertical), ou seja, equivale a camada mais próxima do solo horizontal e a camada que abrange a extensão do solo até a altura média das construções no local.

A área de estudo está localizada no bairro Cidade Universitária (Figura 5), na Região Oeste-RPA 4, microrregião 4.3, situada na parte oeste da cidade, limitando-se com o município de São Lourenço da Mata e Camaragibe a oeste; ao norte com a RPA 3 e rio Capibaribe; ao sul com a RPA 5 e, a leste com o braço morto do rio Capibaribe. É formada por 12 bairros: Cordeiro, Ilha do Retiro, Iputinga, Madalena, Prado, Torre, Zumbi, Engenho do Meio, Torrões, Caxangá, Cidade Universitária e Várzea. Apresenta uma população de 237.738 habitantes, distribuídos numa área de 4.214 ha e 61.125 domicílios. A região é cortada por importantes eixos de transporte como Avenida Recife, Avenida José Rufino, Avenida São Miguel, Avenida Caxangá, Avenida Abdias de Carvalho, BR 101 e BR 232. O bairro possui uma área territorial de 166 ha com uma população residente de 603 habitantes (Atlas Municipal de Recife, 2005).



Figura 5. Localização do Bairro Cidade Universitária em Recife-PE

A urbanização nessa região ocorreu devido a instalação de grandes instituições, tais como o Campus da UFPE, a SUDENE, o Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco - ITEP, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), o Colégio Militar e outros, além das obras rodoviárias e do conjunto habitacional UR-7. Essa urbanização modificou sensivelmente a aparência da região, especialmente no bairro Cidade Universitária, sem, no entanto, alterar significativamente as características que vinham se consolidando ao longo do tempo nos demais bairros circunvizinhos como Várzea, Caxangá, Iputinga e Cordeiro. E mais recentemente, já na segunda metade dos anos 80, a grande invasão de cerca de 3.000 famílias no bairro do Engenho do Meio–Roda de Fogo, também contribuiu de forma expressiva para marcar o processo de urbanização dessa região (Atlas Municipal de Recife, 2005).

O sítio experimental foi instalado no Centro Regional de Ciências Nucleares – CRCN/NE, situado na Cidade Universitária na zona oeste da cidade de Recife- PE. Foram instaladas duas torres micrometeorológicas, projetadas e instrumentadas pela equipe do Laboratório de Física dos Solos do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN/UFPE).

As descrições das duas áreas em que foram instaladas as torres micrometeorológicas é realizada seguir.

3.2.1 Área experimental 01: área de gramado

A torre instrumental com uma estrutura metálica de 3m de altura foi instalada em área de gramado (Figura 6), com coordenadas geográficas de 08° 03' 28,1" de latitude Sul e 34° 56' 54,6" de longitude Oeste. O sistema de alimentação elétrica foi composto por energia diretamente da rede elétrica, utilizando uma bateria estacionária de ciclo profundo (12 V), para manter a corrente constante.

As medidas da temperatura e da umidade relativa do ar foram realizadas por meio de um sensor capacitivo (modelo HMP 45C da Vaisala) em dois níveis acima do solo ($z_1 = 45$ cm; $z_2 = 90$ cm). Esses sensores apresentam medidas com acurácia de $\pm 0,1$ °C para um intervalo de temperatura de 0 a 40°C e acurácia de $\pm 2\%$ para umidade relativa do ar de 0 a 90% e $\pm 3\%$ para umidade relativa do ar de 90 a 100%. A velocidade do vento foi medida em dois níveis acima da superfície do solo ($z_1 = 45$ cm; $z_2 = 90$ cm), através de um anemômetro de conchas (modelo 014 da Met One), com acurácia de $0,11 \text{ m s}^{-1}$. Foram instalados saldos radiômetros para a medida da radiação global (piranômetro - modelo LI 200x da Li-Cor) e para as medições do saldo de

radiação (modelo NR-LITE da Kipp-Zonen). Esses sensores foram instalados na mesma torre, na altura de 2,0 m da superfície do solo e um pluviômetro (Modelo TE525 - Campbell Scientific, Inc, EUA) a 1,5 m para a medida da precipitação pluvial.



Figura 6. Torre micrometeorológica instalada em área gramada na cidade do Recife, PE

Para a medida do fluxo de calor no solo foi instalado um fluxímetro (Modelo HFP01 - Campbell Scientific, Inc, EUA), na profundidade $z = 5,0$ cm, juntamente com um sensor de umidade do solo, na mesma profundidade, além de duas sondas térmicas instaladas horizontalmente, nas profundidades de $z_1 = 2,0$ e $z_2 = 8,0$ cm. Todas essas medidas foram armazenadas como médias a cada 30 minutos, com exceção da pluviometria, que foi calculado seu valor total, em um sistema de aquisição de dados CR10X da Campbell Scientific.

O período de medição dos componentes do balanço de energia, nessa área, foi de junho de 2010 até julho de 2011.

Além desses sensores, também foi instalado um saldo radiômetro (Modelo CNR1 da Kipp & Zonen) para coleta de dados do balanço de radiação (radiação global, radiação de ondas curtas refletida, radiação de ondas longas atmosférica e radiação de ondas longas emitida pela superfície), durante o período de 14 de abril a 26 de julho de 2011.

3.2.2 Área experimental 02: área com cobertura asfáltica

A torre instrumental em área com cobertura asfáltica (Figura 7), foi montada em uma estrutura metálica de 1,5m altura, com coordenada geográfica 08° 03' 30,4" latitude Sul e 34° 56' 49,5" longitude Oeste. O sistema de alimentação elétrica foi composto por um painel solar (10 W) e uma bateria estacionária de ciclo profundo (12 V), alojada em uma caixa selada a 1,2 m de altura.



Figura 7. Torre micrometeorológica instalada na área com cobertura asfáltica na cidade do Recife, PE.

Os sensores usados para a medição da temperatura e umidade relativa do ar, e da velocidade do vento, foram dos mesmos fabricantes e instalados na mesma configuração da torre da área com gramado.

Para a medição da radiação global utilizou-se um piranômetro, da mesma marca e modelo do que foi instalado na torre da área com gramado. Já para a medição do saldo de radiação utilizou-se um saldo radiômetro (modelo Q-7.1 da REBS). Esses sensores foram instalados numa altura de 1,2 m da superfície do solo.

Para a medida do fluxo de calor no solo foi instalado, no asfalto, fluxímetro (modelo HFT3- Campbell Scientific, Inc, EUA), na profundidade $z = 3,0$ cm, duas sondas térmicas (modelo 108 - Campbell Scientific, Inc, EUA) instaladas verticalmente, nas profundidades de $z_1 = 1,5$ e $z_2 = 3,0$ cm. Todas essas medidas foram armazenadas como médias a cada 30 minutos, em um sistema de aquisição de dados CR10X da Campbell Scientific.

O período de medição dos componentes do balanço de energia foi de agosto de 2010 até julho de 2011.

Também se instalou um saldo radiômetro (Modelo CNR1 da Kipp & Zonen) para coleta de dados do balanço de radiação (radiação global, radiação de onda curta refletida, radiação de onda longa atmosférica e radiação de onda longa emitida pela superfície), durante o período de 31 de julho até 10 de novembro de 2011.

3.3 Determinação do balanço de energia

Para a determinação dos componentes do balanço de energia (saldo de radiação e fluxos de calor latente, sensível e no solo) nas duas áreas experimentais foi usada a seguinte equação:

$$R_n = LE + H + G \quad (1)$$

sendo, R_n o saldo de radiação ($W\ m^{-2}$); LE o fluxo de calor latente (sendo L o calor latente de vaporização da água e E a taxa por unidade de área de evaporação) ($W\ m^{-2}$); H o fluxo de calor sensível ($W\ m^{-2}$) e G o fluxo de calor no solo ($W\ m^{-2}$).

Para a determinação dos fluxos de calor latente (LE) e calor sensível (H) utilizou-se o método da razão de Bowen (β), a qual representa a partição de energia entre H e LE . A mesma foi obtida a partir de leituras de temperatura do ar e pressão de vapor d'água em níveis diferentes, dada pela equação:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (2)$$

sendo γ a constante psicrométrica ($0,066\ k\ Pa\ ^\circ C^{-1}$), ΔT a diferença de temperatura do ar ($^\circ C$) e Δe a diferença de pressão de vapor d'água.

A pressão de saturação de vapor (e_s), em kPa, foi obtida através da equação de Murray (1967):

$$e_s = 0,61 \exp \left[\frac{17,27T}{237,3 + T} \right] \quad (3)$$

Com os dados de umidade relativa do ar (UR%) e dos valores calculados da pressão de saturação de vapor (e_s), foram calculados os valores de pressão real de vapor (e) pela equação:

$$e = UR * e_s / 100 \quad (4)$$

Os fluxos de calor latente (LE) e calor sensível (H) foram obtidos pelas equações 5 e 6:

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad (5)$$

$$H = \frac{\beta}{1 + \beta} (Rn - G) \quad (6)$$

Para se evitar possíveis erros na estimativa dos fluxos de calor latente e de calor sensível, os valores da razão de Bowen menores do que - 0,75 (Ortega - Farias et al., 1996), bem como aqueles valores nos quais as medições dos gradientes de temperatura e de pressão de vapor estavam menores do que o limite da resolução dos sensores foram eliminados, sendo estes substituídos por interpolação dos valores precedentes e subsequentes válidos.

3.4 Determinação do balanço de radiação

O balanço de radiação na superfície é dado pelo adição dos fluxos de radiação de ondas curtas e ondas longas na superfície. A equação do balanço de radiação é descrita a seguir:

$$Rn = (Rg - Kr) + (Li - Lr) \quad (7)$$

em que Rn representa o saldo de radiação ($W m^{-2}$); Rg é a radiação solar global ($W m^{-2}$); Kr é a radiação de ondas curtas refletida ($W m^{-2}$); Li é a radiação de ondas longas da atmosfera ($W m^{-2}$) e Lr é a radiação de ondas longas emitida pela superfície ($W m^{-2}$).

O balanço de radiação de ondas curtas (K), definido pela diferença entre a radiação de ondas curtas que incide na superfície terrestre (radiação solar global) e a radiação de ondas curtas que é refletida, foi calculado pela seguinte equação:

$$K = Rg - Kr \quad (8)$$

O balanço de radiação de ondas longas (L) foi obtido pela diferença entre a radiação de onda longa que incide na superfície terrestre e a radiação de ondas longas que é emitida, e é dado pela seguinte equação:

$$L = Li - Lr \quad (9)$$

Com os dados de Rg e Kr calculou-se o albedo (α), ou coeficiente de refletividade, das áreas com gramado e cobertura asfáltica, por meio da equação:

$$\alpha = \frac{Kr}{Rg} \quad (10)$$

3.5 Estimativa do saldo de radiação usando a radiação solar global

Em ambas as áreas, os dados de Rg foram medidos com um piranômetro, modelo LI 200X (LI-COR, Lincoln, NE), enquanto os de Rn foram medidos com um saldo radiômetro, modelo Q-7.1 (Radiation Energy Balance Systems, Beaverton, OR) e modelo NR-LITE (Kipp & Zonen B.V., Delft, The Netherlands) para área de asfalto e gramado, respectivamente. Os sensores foram instalados no centro das áreas, a dois metros de altura, em uma estação meteorológica automática. As medidas foram coletadas e armazenadas como médias a cada 30 min em um sistema de aquisição de dados CR 10X (Campbell Scientific, Logan, UT).

As medidas foram realizadas de 01/08/2010 a 31/03/2011 para a área gramada e asfáltica.

Na totalização de Rn e Rg, de $W\ m^{-2}$ para $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$, foram usados dados do período diurno das 6 às 18 horas, obtendo-se também a relação entre essas variáveis ($Rn\ Rg^{-1}$) para cada dia. Aos dados de Rg e Rn da área de asfalto e de gramado (dados de agosto a outubro de 2010) foram ajustadas equações de regressão linear simples, conforme metodologia apresentada por Sentelhas e Nascimento (2003), sendo a equação de regressão:

$$Rn = bRg \quad (11)$$

em que R_n é o saldo de radiação, em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; b é o coeficiente angular da reta obtida por meio da regressão linear simples; e R_g é a radiação solar global, em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Após a obtenção das equações de regressão, foram feitas as validações das mesmas. Para as duas áreas, utilizaram-se os dados de novembro de 2010 a março de 2011. A avaliação do desempenho dos modelos foi realizada por meio do coeficiente de determinação (R^2), da raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME).

A raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME) foi obtida de acordo com Heldwein et al. (2012):

$$\text{RQME} = \left(\sum (E_i - O_i)^2 / N \right)^{0,5} \quad (12)$$

em que “E” é o valor estimado, “O” é o valor observado e N é o numero de observações utilizado para a validação.

O índice de concordância “d” (WILLMOTT et al., 1985) é dado pela seguinte equação:

$$d = 1 - \frac{\sum (E_i - O_i)^2}{\sum \left(\left(|E_i - \bar{O}| \right) + \left(|O_i - \bar{O}| \right) \right)^2} \quad (13)$$

sendo E_i e O_i são os valores estimados pelo modelo e observados, respectivamente, e $\bar{O}$ a média dos valores estimados.

De acordo com Santos e Camargo (2006), o “r” indica a precisão do modelo, ou seja, quanto da variação da variável dependente é explicada por aquela das variáveis independentes. O índice “d”, com variação entre 0 e 1, indica o grau de exatidão entre os valores estimados e observados, quanto mais próximo de 1, melhor a exatidão do modelo em estimar a variável dependente.

O índice de desempenho (c) foi proposto por Camargo & Sentelhas (1997), com critérios conforme a Tabela 2, para indicar o desempenho dos métodos, reunindo os índices de precisão r e de exatidão “d”, sendo expresso pela seguinte equação:

$$c = r.d \quad (14)$$

em que: “c” é o índice de desempenho, “d” é o índice de concordância, adimensional, variando de 0 a 1

Tabela 2. Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa de R_n pelo índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Valor de “c”	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sufrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

4. Resultados e Discussão

Os resultados e discussão são apresentados para cada área separadamente, sendo que, em cada área, são mostrados inicialmente os dados climáticos que influenciam os balanços de radiação e de energia. Depois serão apresentados os resultados dos balanços de energia e de radiação. Após isso, será feita uma comparação dos componentes do balanço de energia para as duas áreas.

4.1 Resultados para a área de gramado

4.1.1 Variáveis climáticas

Na Figura 8 é apresentada a temperatura e umidade relativa média do ar na cidade de Recife-PE, durante o período de 08/06/2010 a 31/07/2011. A temperatura do ar obteve os menores valores no mês de julho de 2010, no dia 30/07/2010 com valor de 21,71°C e também no mês de julho de 2011, com valor de 20,89°C no dia 10/07/2011, mostrando que, no período analisado, o mês de julho é o que se apresenta com as temperaturas mais amenas.

Santos et al. (2009), analisando as temperaturas médias diárias para os bairros de Curado e San Martin, em Recife-PE, observaram que as temperaturas médias mínimas diárias para o bairro do Curado variaram entre 24 a 25°C; já para o bairro de San Martin, apresentou temperaturas médias mínimas que variaram entre 20 a 24°C.

Já os maiores valores de temperatura do ar ocorreram nos meses de outubro de 2010 a março de 2011, com maior valor de temperatura média diária de 28,66°C para o dia 26/03/2011. A média de temperatura para o período analisado é de 23°C.

Gomes (2010), analisando as variáveis meteorológicas na cidade de Cuiabá-MT, encontrou valor médio anual da temperatura de 26,62°C, com a maior média de 30,16°C em setembro e a menor de 24,18°C em julho. A máxima média horária de 35,31°C foi registrada em setembro às 16 horas e a mínima média horária de 19,2°C em julho às 7 horas.

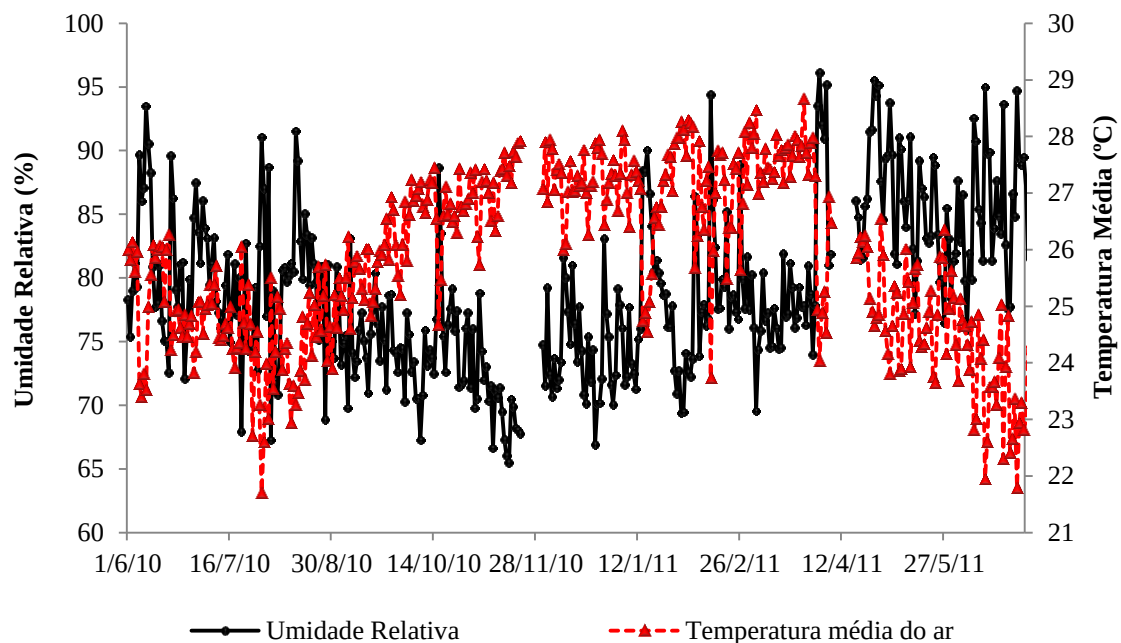


Figura 8. Temperatura e umidade relativa média do ar em área de gramado na cidade do Recife-PE, durante o período de 08/06/2010 a 31/07/2011

Para a umidade relativa do ar, pode-se observar uma grande variabilidade, sendo o valor mínimo de 65,50% para o dia 16/11/2010 e valor máximo de 96% para o dia 02/04/2011. A média de umidade relativa para o período é de 85%.

Conforme Santos et al. (1999), a umidade relativa entre dois bairros (Curado e San Martin) analisados no município de Recife, não apresentou significativas diferenças. O bairro de San Martin obteve os maiores índices de umidade relativa do ar, provavelmente devido às baixas temperaturas, que motivou o aumento das taxas de umidade relativa do ar.

Gomes (2010), na cidade de Cuiabá-MT, encontrou que a umidade relativa apresentou uma sazonalidade característica com valor médio máximo mensal de 78% em fevereiro e mínimo de 36% em setembro, com uma diferença entre as estações úmida e seca de 22%.

Na Figura 8 os meses de maio, junho e julho registraram os menores valores de temperatura, fato que ocorreu devido à influência de altos índices de precipitação nesses meses (Figura 9), pois com grande nebulosidade há uma diminuição da radiação solar que chega à superfície, deixando o ambiente mais ameno.

Os dados de precipitação diária são apresentados na Figura 9. Verifica-se, que ocorreu um total de chuvas, no período de 08/06/2010 a 31/07/2011, de 3.974,2 mm.

O período com maiores registros de chuva ocorreu nos meses de junho de 2010 e de maio a julho de 2011, com valores mensais em torno de 500 mm. O maior valor diário de precipitação foi de 150 mm e ocorreu em 18/06/2010. Para o período analisado, os meses de agosto a dezembro de 2010 são os mais secos, sendo o mês de outubro com menor total mensal de 36,5 mm.

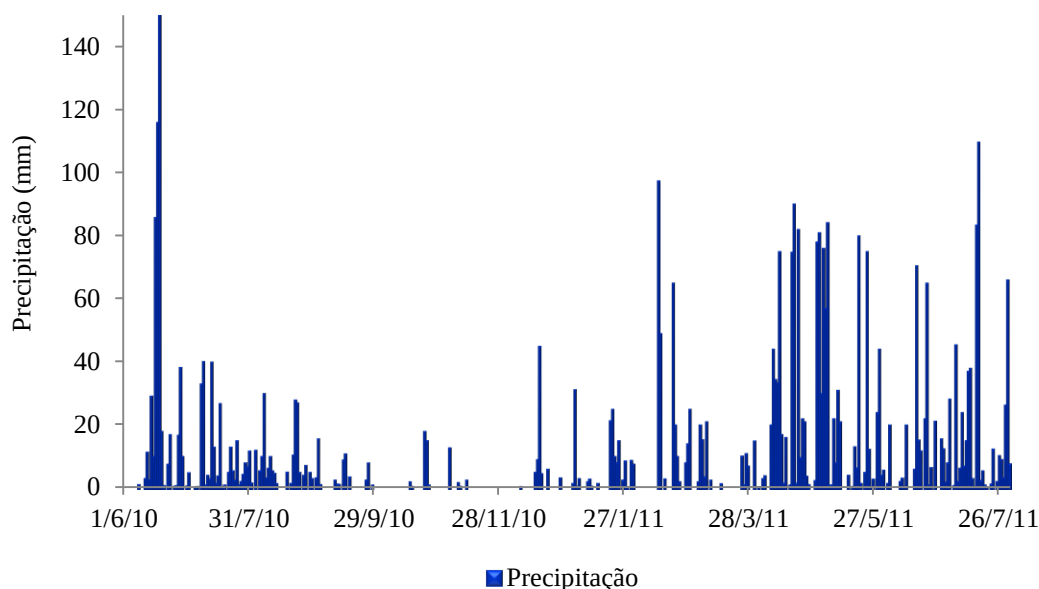


Figura 9. Precipitação na cidade do Recife, durante o período de 08/06/2010 a 31/07/2011.

A figura 10 apresenta a normal climatológica de precipitação em Recife-PE (1961-1990) de acordo com o INMET. A precipitação pluviométrica para os meses de abril, maio, junho e julho destacam-se como os meses mais chuvosos, com totais mensais acima de 300 mm para o período de 1961-1990.

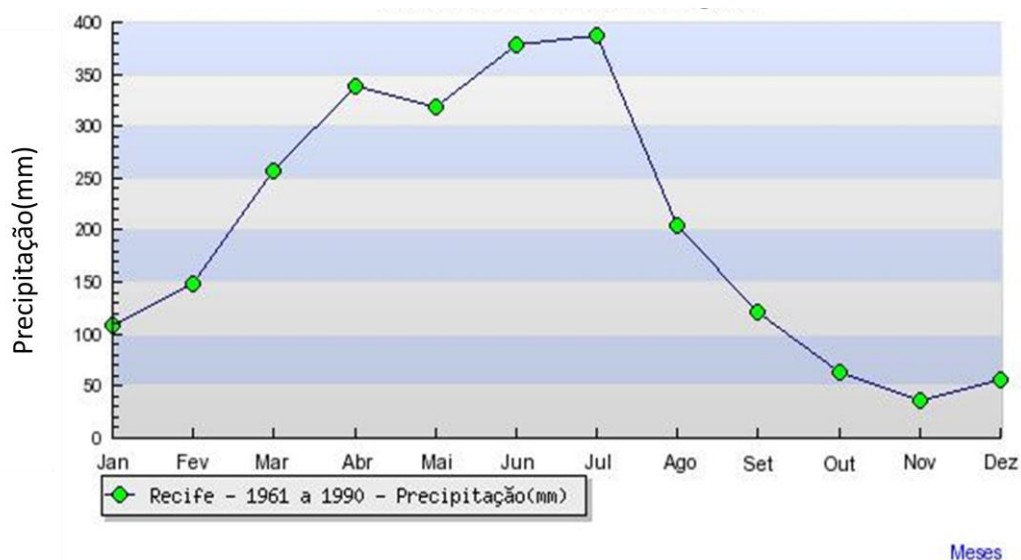


Figura 10. Normal climatológica de precipitação para Recife – PE, 1961-1990.

Fonte INMET.

Analisando os valores de precipitação para o ano de 2011, observa-se que foi um ano atípico devido a grandes registros de precipitação, os quais nos meses de maio, junho e julho tiveram totais mensais bem acima de 300 mm, chegando a quase o dobro do valor observado na normal climatológica. Porém, mesmo com valores bem superiores a normal climatológica percebe-se que os meses mais chuvosos são os mesmos em ambas as figuras 9 e 10.

Os dados de velocidade do vento são apresentados na Figura 11, compreendendo o período de 08/06/2010 a 31/07/2011. A velocidade do vento variou entre 0,67 a 2,60 m s^{-1} . Observou-se, também, que os maiores valores foram registrados nos meses de agosto de 2010 a janeiro de 2011 com valores maiores que 2,0 m s^{-1} .

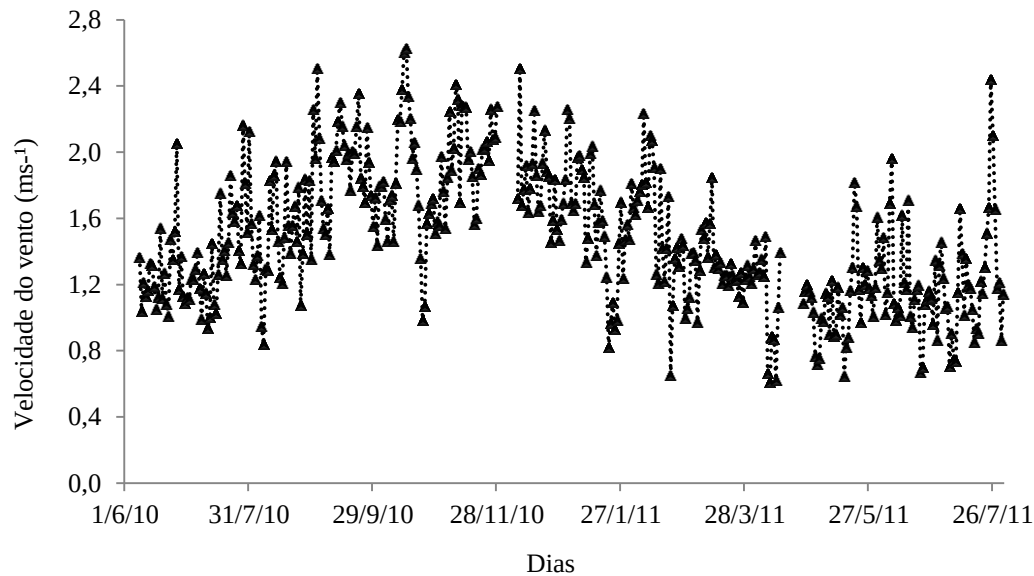


Figura 11. Velocidade do vento para área de gramado em Recife-PE.

Gomes (2010), analisando as variáveis meteorológicas na cidade de Cuiabá-MT, encontrou valor máximo médio mensal da velocidade do vento igual $2,81 \text{ m s}^{-1}$, tendo ocorrido no mês de janeiro e a mínima foi de $1,43 \text{ m s}^{-1}$ e ocorreu em abril, sendo que a maior média horária do mês foi $4,28 \text{ m s}^{-1}$ e foi registrada às 12 horas em janeiro.

4.1.2 Componentes do balanço de energia

O comportamento da evolução diária da radiação global (R_g), do saldo de radiação (R_n) e dos fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G), em área de gramado em Recife-PE, para o período de 08/06/2010 a 31/07/2011, é apresentado na Figura 12.

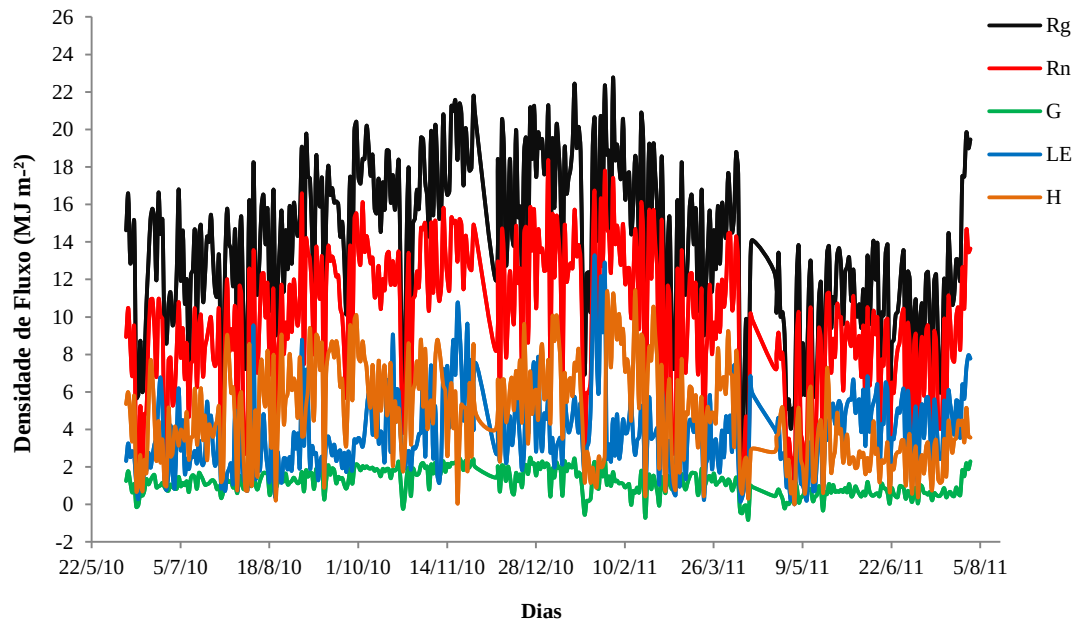


Figura 12. Evolução diária dos componentes do balanço de energia em área urbana (gramado), em Recife-PE, para o período de 08/06/2010 a 31/07/2011.

Observa-se que os valores de radiação global variaram entre 2,65 e 22,70 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com valor médio de 13,88 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; os valores do saldo de radiação (R_n) variaram entre 0,38 e 17,78 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ com valor médio de 9,8 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, enquanto os valores do fluxo de calor latente (LE) variaram entre 0,08 e 13,24 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com um valor médio de 2,11 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Para o fluxo de calor sensível (H), os valores variaram entre 0,09 e 11,42 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ com valor médio de 4,77 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Os valores de fluxo de calor no solo (G) apresentaram valores médios de 0,63 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Os fluxos de calor latente e de calor sensível tiveram elevada variação, quando comparados ao fluxo de calor no solo, que apresentou valores quase constantes. Essa variação dos fluxos de calor latente e sensível pode ter ocorrido em resposta à distribuição da precipitação pluvial e da presença ou ausência de nebulosidade.

A variação dos valores diários médios mensais dos fluxos de calor sensível e calor latente em área com gramado na cidade de Recife durante o período de 08/06/2010 a 31/07/2011 é apresentada na Figura 13. Observa-se que o fluxo de calor sensível apresenta valor máximo mensal de 7,93 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ em fevereiro de 2011 e um valor mínimo de 2,42 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ em junho de 2011. Para o fluxo de calor latente o valor máximo de 6,08 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ocorreu em novembro de 2010 e mínimo de 2,57 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ em julho de 2010. Ferreira (2010), analisando os componentes do balanço de energia, na

cidade de São Paulo, observou em 2004 valores mensais de fluxo de calor latente, máximo de $5,54 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ em novembro e mínimo de $2,66 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ em maio.

O fluxo de calor latente utiliza 32% do saldo de radiação em julho de 2010 e 45% em novembro de 2011. Já o fluxo de calor sensível corresponde a 62% e 30% do saldo de radiação nos meses de fevereiro e junho de 2011, respectivamente.

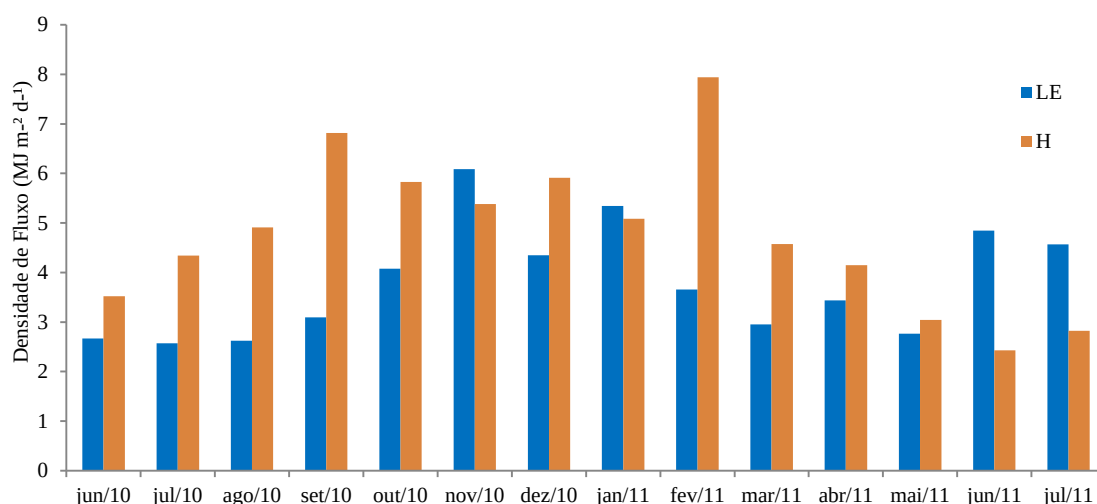


Figura 13. Variação dos valores diários médios mensais dos fluxos de calor sensível e de calor latente em área de gramado em Recife-PE durante o período de junho de 2010 a julho de 2011

O mês de fevereiro de 2011 foi o mês com maior quantidade de energia direcionada para o aquecimento do ar, fluxo de calor sensível foi o principal responsável, tendo temperatura média mensal de $27,37^{\circ}\text{C}$ e total pluviométrico de 300 mm. Nos meses de junho e julho de 2011, ocorreu maior disparidade entre os valores de fluxos de calor latente e de calor sensível, com valores de fluxo de calor latente 50% e 38% maiores que o fluxo de calor sensível para os respectivos meses. Esses meses encontraram-se no período chuvoso com temperaturas médias mensais de $24,77^{\circ}\text{C}$ em junho e $23,69^{\circ}\text{C}$ em julho, esse sendo o mais ameno de todos os meses analisados.

4.1.3 Componentes do balanço de energia para períodos secos e úmidos

Neste ítem são mostrados os dados climáticos (precipitação, temperatura e umidade relativa do ar) para períodos secos e úmidos e relacioná-los com a partição dos fluxos de energia em área de gramado na cidade de Recife-PE, durante períodos secos e

úmidos. Para representar o período seco foi escolhido o mês de outubro de 2010 (01 a 31/10/2010) e para o período úmido o mês de maio de 2011 (01 a 31/05/2011).

Os dados de precipitação pluvial durante os períodos seco e úmido são apresentados na figura 14. Verifica-se, para o período seco (Figura 14a), que o total de chuvas foi de 36,5 mm, sendo distribuídos em apenas 5 eventos, e que o dia 23/10/2010 registrou o maior valor (18 mm). O total de chuvas, no período úmido (Figura 15b), foi de 685,1 mm, sendo que em apenas 6 dias não ocorreu evento chuvoso. O maior evento chuvoso (84 mm) ocorreu no dia 05/05/2011, sendo que ainda em outros quatro dias ocorreram eventos acima de 70 mm.

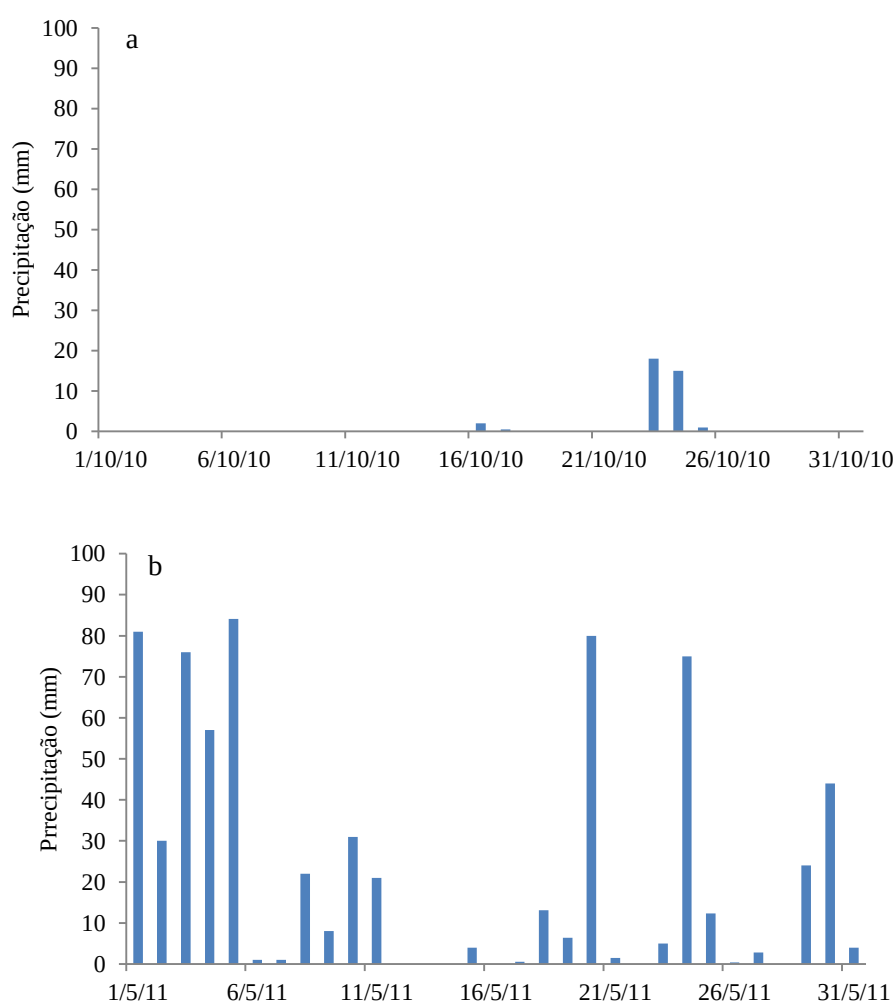


Figura 14. Precipitação pluvial diária em Recife, para o mês de outubro (a) de 2010 e maio de 2011 (b)

Na Figura 15 são apresentadas as temperaturas máximas e mínimas do ar, para os períodos seco e úmido. A temperatura do mês de outubro apresenta uma amplitude média de $6,22^{\circ}\text{C}$, tendo seu pico ($30,54^{\circ}\text{C}$), no dia 21/10/10. Araújo e Caram (2006) estudando variáveis ambientais, no bairro da Ribeira em Natal-RN, obtiveram uma média geral da temperatura do ar no mês fevereiro de $30,3^{\circ}\text{C}$ chegando a temperaturas máximas de 34°C no mesmo período.

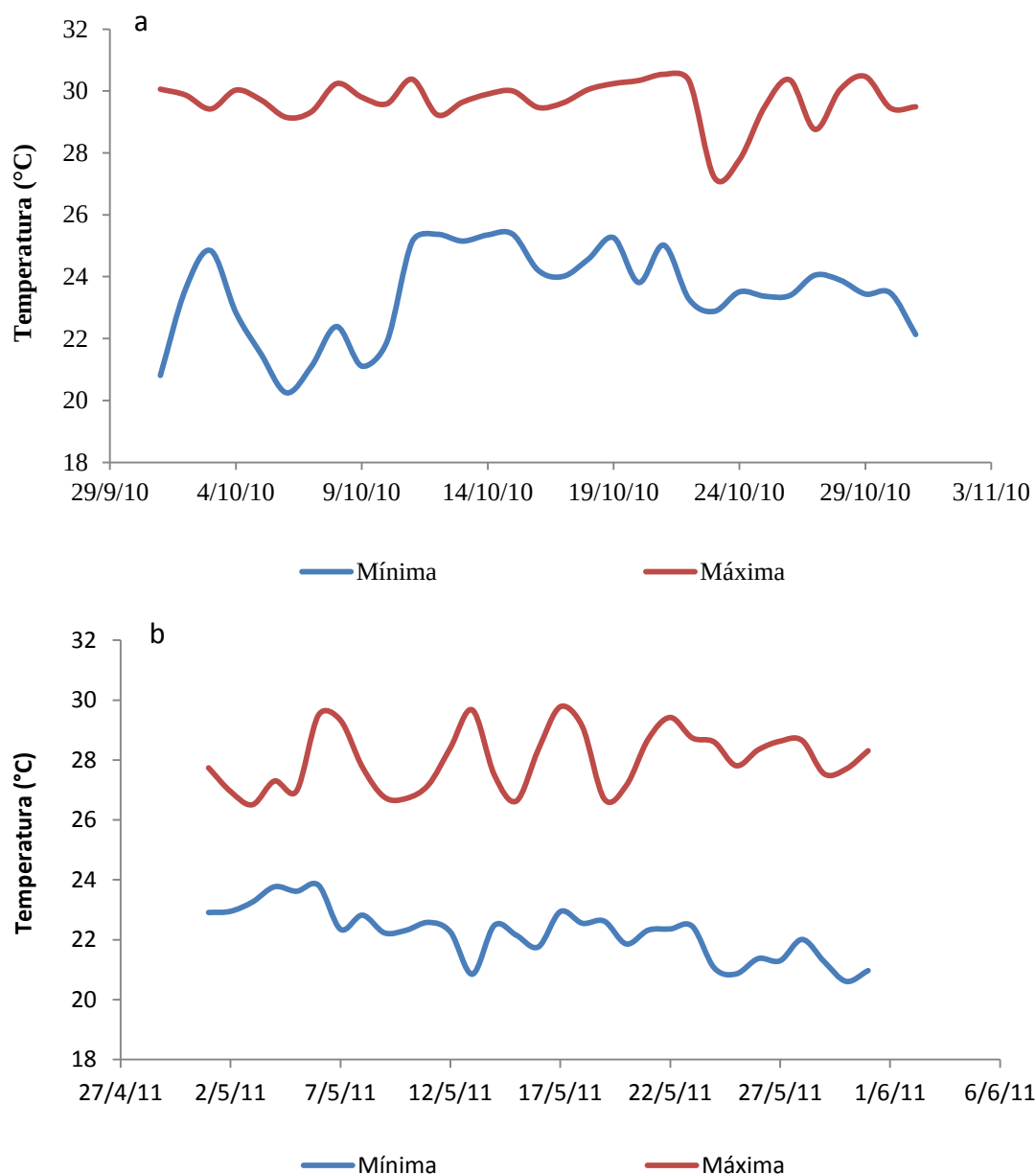


Figura 15. Temperaturas máxima e mínima do ar para os meses de outubro de 2010 (a) e maio de 2011 (b).

A temperatura do mês de maio apresenta uma amplitude média de $5,8^{\circ}\text{C}$, tendo seu pico, no dia 17/05/11 com um valor de $29,78^{\circ}\text{C}$ e o menor valor no dia 30/05 com valor de $20,61^{\circ}\text{C}$. A média de temperatura para o período úmido é de 25°C . O menor valor da temperatura para o período seco ocorreu no dia 06/10/10, com valor de $20,25^{\circ}\text{C}$, sendo a média mínima mensal de $23,45^{\circ}\text{C}$. A média de temperatura para o período seco é de $26,6^{\circ}\text{C}$. A variação entre os valores máximos e mínimos se deve ao fato de no período úmido ter ocorrido um grande valor de precipitação.

A Figura 16 apresenta o comportamento da umidade relativa do ar para os meses de outubro de 2010 e maio de 2011. Pode-se observar uma grande variabilidade na umidade relativa máxima e mínima nos dois períodos.

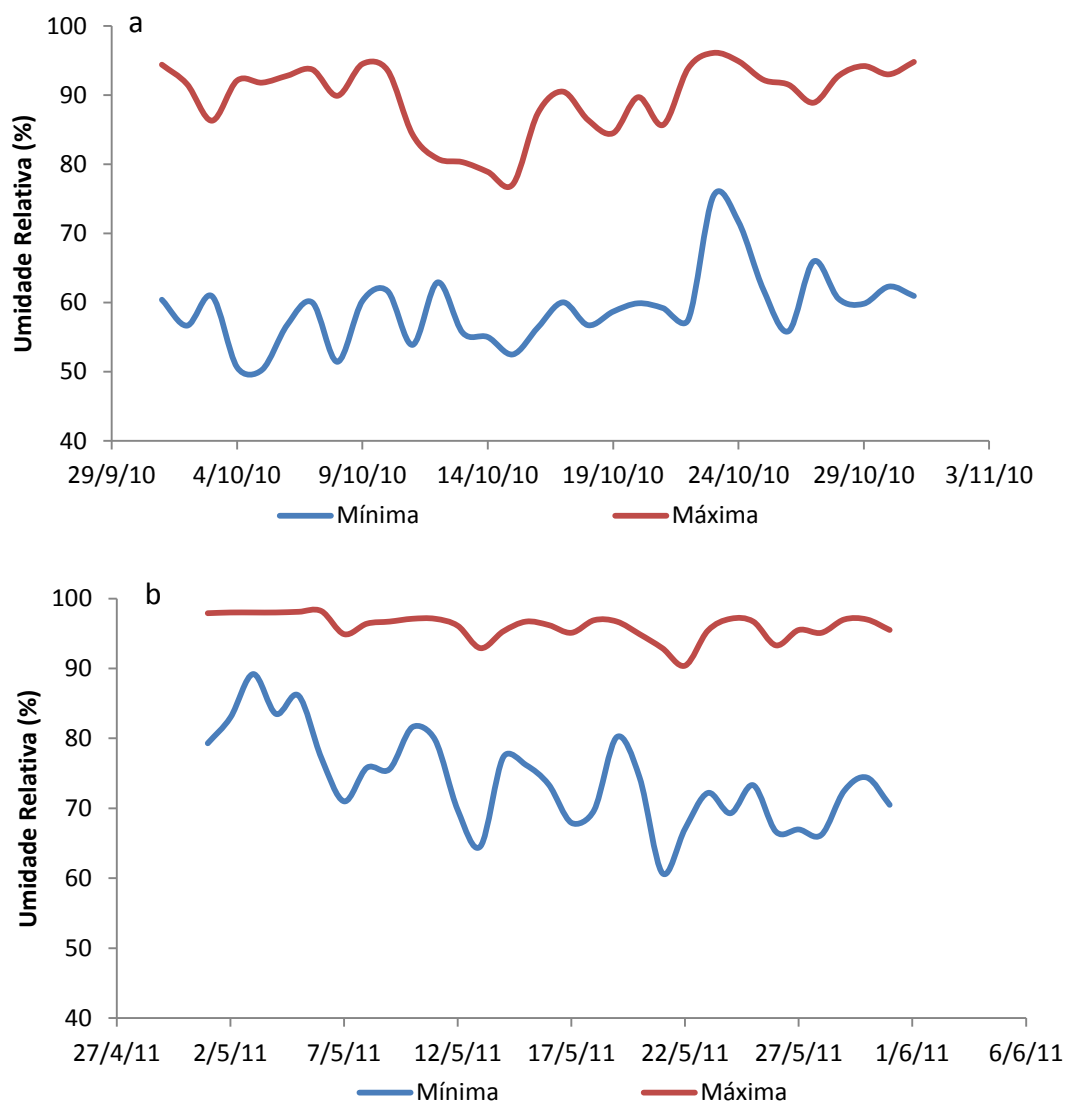


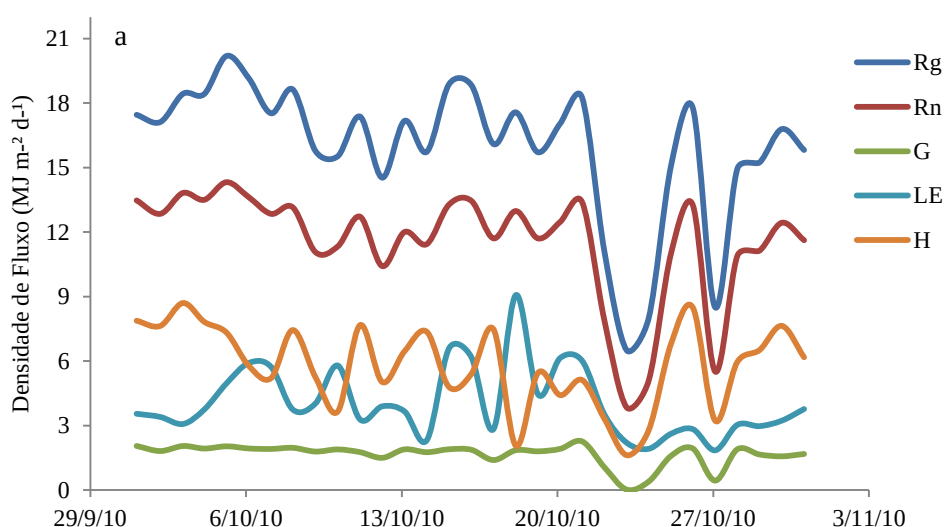
Figura 16. Umidade relativa do ar máxima e mínima para o mês de outubro de 2010 (a) e maio de 2011 (b), Recife.

A umidade relativa máxima, no período seco, tem-se o maior valor de 96 % no dia 23/10/2010, com uma amplitude mensal de 19% entre os valores máximos. No período seco a umidade relativa mínima, teve o menor valor em torno de 50% no dia 05/10/10. A média de umidade relativa para o período seco é de 74%. Araujo e Caram (2006) estudando variáveis ambientais no bairro da Ribeira em Natal-RN obtiveram valores para a umidade relativa com uma média geral de 67% para o mês de fevereiro.

Para o período chuvoso a umidade relativa máxima do ar teve o maior valor de 98% no dia 06/05, com uma média máxima para o período de 96%. No período chuvoso a umidade relativa mínima, obteve menor valor em torno de 61% no dia 21/05. A média de umidade relativa para o mês de maio é de 85%.

O comportamento da evolução diária da radiação global (Rg), do saldo de radiação (Rn) e dos fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G), em área de gramado, em Recife-PE, para os meses de outubro de 2010 e maio de 2011, é apresentada na Figura 17. Pode-se observar no período seco, como no chuvoso que as variações do saldo de radiação (Rn) seguiram as variações da radiação global (Rg).

Observa-se, na figura 17, para o período seco que os valores de radiação global variaram entre 6,50 e 20,18 MJ m⁻² d⁻¹, com valor médio de 15,97 MJ m⁻² d⁻¹; os valores do saldo de radiação (Rn) variaram entre 3,85 e 14,31 MJ m⁻² d⁻¹ com valor médio de 11,55 MJ m⁻² d⁻¹, enquanto os valores do fluxo de calor latente (LE) variaram entre 1,85 e 9 MJ m⁻² d⁻¹, com um valor médio de 4 MJ m⁻² d⁻¹.



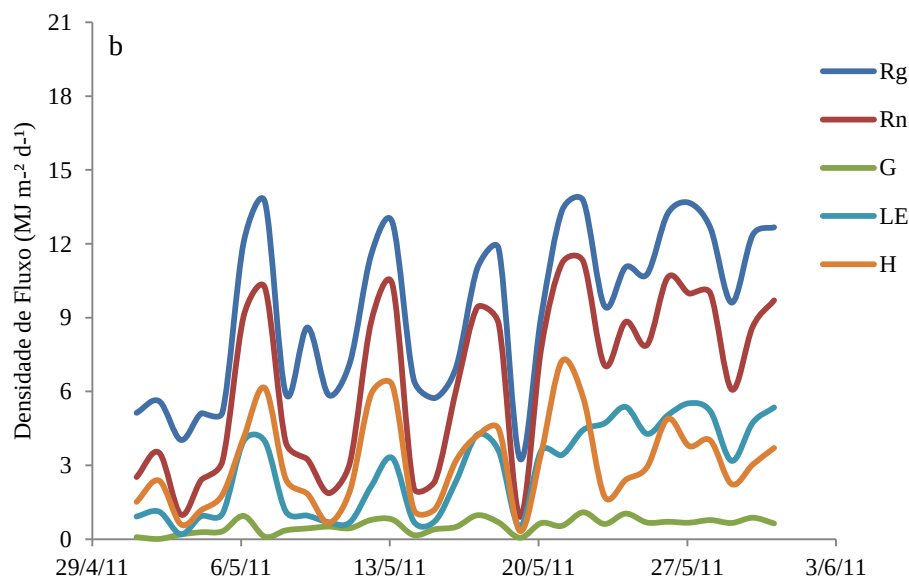


Figura 17. Evolução diária dos componentes do balanço de energia, em área de gramado, em Recife-PE, para os meses de outubro de 2010 (a) e maio de 2011 (b)

Para o período seco, o H variou entre 1,64 e 8,7 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com valor médio de 5,8 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Os valores de fluxo de calor no solo (G) se apresentaram quase que constante, com média de 1,66 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Esse resultado dos componentes do balanço no período seco ocorreu devido ao período caracterizar-se com pouco ou nenhum registro de precipitação pluviométrica e pouca incidência de nuvens, assim não havendo obstáculos para incidência da radiação.

Observa-se, ainda na figura 17, que no período chuvoso os valores de radiação global variaram entre 3,27 e 13,75 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com valor médio de 9,34 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; os valores do saldo de radiação (Rn) variaram entre 0,90 e 11,28 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ com valor médio de 6,2 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Os valores de fluxo de calor no solo apresentaram-se quase que constantes e com valores muito baixo, com uma média de 0,58 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Para o fluxo de calor sensível (H), os valores variaram entre 0,10 e 7,24 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ com valor médio de 3,1 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, enquanto os valores do fluxo de calor latente (LE) variaram entre 0,09 e 5,52 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com um valor médio de 2,80 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Essa variação dos fluxos de calor latente e sensível pode ter ocorrido em resposta à distribuição da precipitação pluvial e da grande nebulosidade nesse período.

Na figura 18 é apresentada a variação diária da razão entre o saldo de radiação e a radiação global, e entre o saldo de radiação e os fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G), em Recife no mês de outubro de 2010 e maio de 2011.

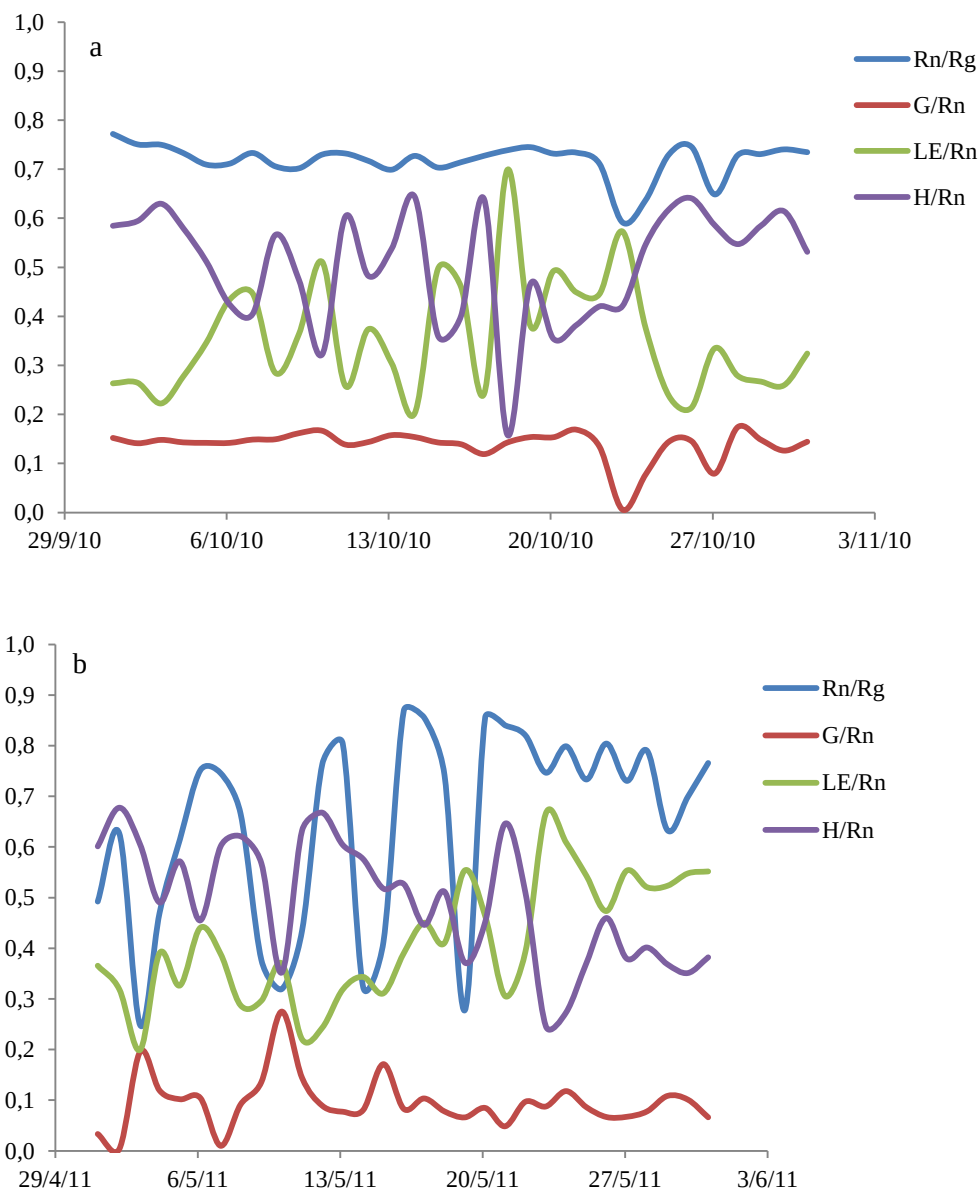


Figura 18. Variação diária da razão entre o saldo de radiação e a radiação global, e entre o saldo de radiação e os fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G), em Recife no mês de outubro de 2010 (a) e maio de 2011 (b).

Observa-se que para o período seco a porção da radiação solar global (R_g) transformada em energia disponível ao sistema, ou seja, saldo de radiação (R_n), apresenta uma distribuição regular com um valor médio de 0,72 com o valor máximo de 0,77 dia 01/10, sendo o menor valor, de 0,59, observado dia 23/10/10.

Ainda na figura 18, observa-se no período seco LE/R_n médio foi de 0,50, ocorrendo uma variabilidade entre valores altos e baixos. Isso ocorreu devido ao falta de precipitação, que proporciona o aumento da temperatura do ar e a utilização da energia para o aquecimento do ar, H/R_n médio foi de 0,36 com os maiores valores 0,70 no dia 18/10/10 e G/R_n variaram entre 0,17 e 0,01, com um valor médio de 0,14.

Barradas et al. (1999), encontraram que durante a estação seca que os fluxos de calor latente e sensível foram de 25 e 69%, respectivamente, e na estação úmida foram de 70 e 27% respectivamente.

No período chuvoso partição da radiação solar global (R_g) em saldo de radiação (R_n), apresenta uma distribuição regular com um valor médio de 0,63 com o valor máximo de 0,87 dia 16/05, sendo 0,25 o menor valor observado dia 03/05/11.

Para o período chuvoso observa-se que a fração do saldo de radiação (R_n) foi utilizado em sua maior parte, como fluxo de calor sensível (H), com valor médio de 0,48, ocorrendo uma grande variabilidade entre valores. A partição entre o fluxo de calor latente e o saldo de radiação (LE/R_n), mostra que o valor médio foi de 0,40 com os maiores valores 0,67 no dia 23/05/11. Já para a porção do saldo de radiação utilizada pelo fluxo de calor no solo (G/R_n), obteve um valor médio de 0,11.

Balogun et al. (2009), estudando os componentes do balanço de energia no subúrbio da cidade de Kansas, Missouri, constataram que a partição do saldo de radiação para o fluxo de calor latente foi de 0,55, já a partição entre o fluxo de calor sensível e o saldo de radiação foi de 0,23 para um período analisado no mês de agosto (verão) de 2004.

A evolução horária dos fluxos de energia em área urbana, em Recife/PE, para dias representativos para o período seco, mês de outubro 03/10/2010 e 12/10/2010 e para dias representativos para o período chuvoso, mês de maio 14/05/2011 e 31/05/2011 é apresentada na Figura 19.

Observa-se, para os dias analisados, que o fluxo de calor sensível é o principal consumidor do saldo de radiação. O fluxo de calor sensível para o dia 03/10/2010 (63 %) foi maior que para o dia 12/10/2010 (48 %). O fluxo de calor sensível para o dia 14/05/2011 foi o principal consumidor do saldo de radiação com 58 %, já para o dia 31/05/2011 a partição do saldo de radiação em o fluxo de calor latente de 55 % em seguida o fluxo de calor sensível com 38%.

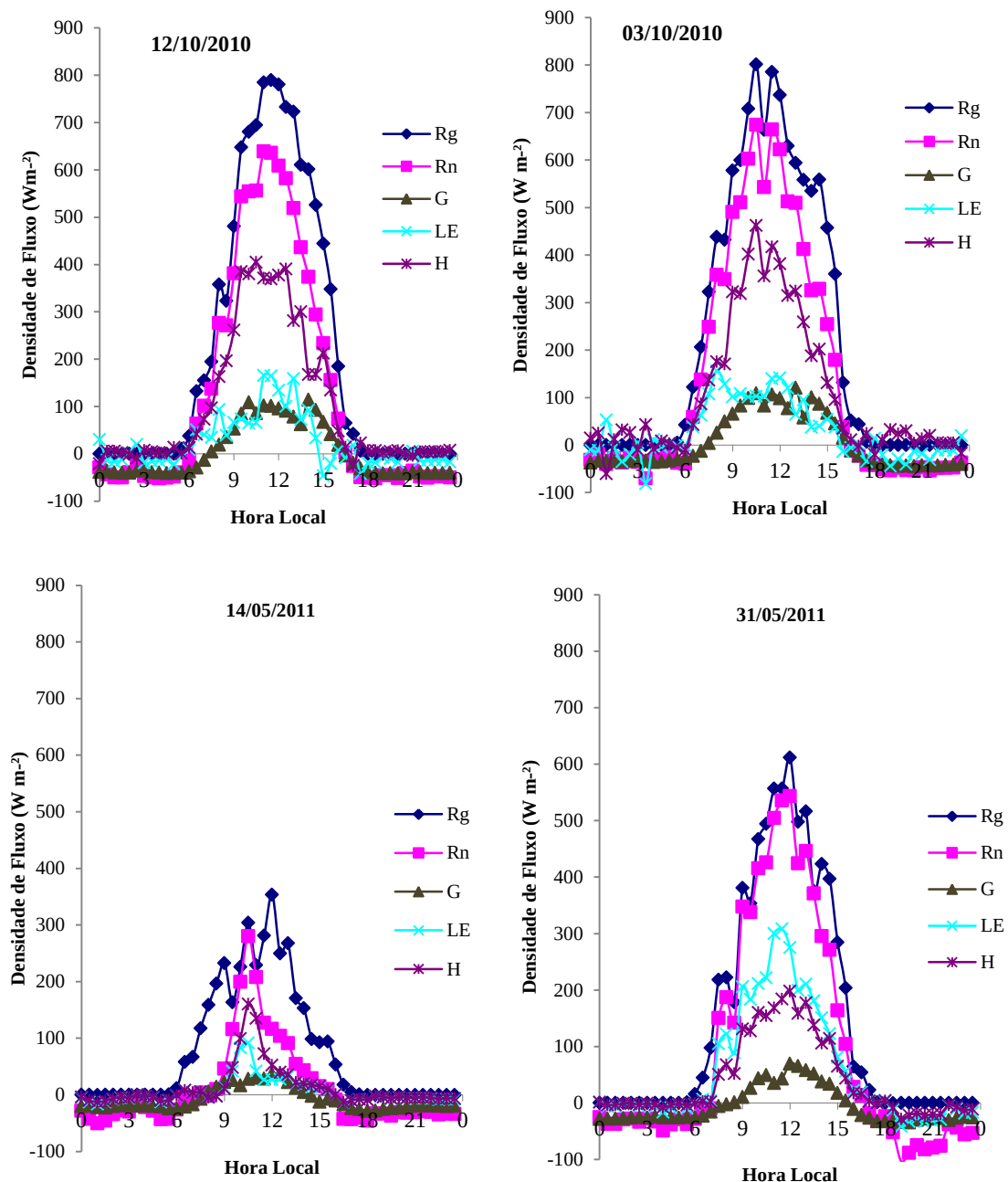


Figura 19. Evolução horária dos fluxos de energia em área urbana (gramado), Recife/PE

Em ambos os dias do período seco os valores da radiação global foram altos sendo os valores máximos de 802 W m⁻² e 785 W m⁻² para os dias 03/10 e 12/10 respectivamente. Já o fluxo de calor sensível também teve valores máximos de 462 W m⁻² e 404 W m⁻² dos respectivos dias. Esses altos valores de fluxo de calor sensível se devem a cobertura do solo, com grama bem rala, ficando o solo praticamente exposto. O fluxo de calor latente corresponde uma pequena parcela da energia utilizada no dia 03/10 de 22 %, já a fluxo de calor no solo teve seu pico ao meio dia do dia 03/10 com

valor de 120 W m^{-2} . Esses valores dos componentes do balanço de energia ocorreram devido à falta de chuva no período.

No período chuvoso os maiores valores do saldo de radiação para os dois dias escolhidos foram de 280 W m^{-2} e 543 W m^{-2} para os dias 14 e 31 de maio, respectivamente. Já o fluxo de calor no solo obteve maiores valores de 52 W m^{-2} e 70 W m^{-2} , ambos às 12h, para os dois dias analisados. No dia 14/05/11 o de fluxo de calor sensível foi maior que o fluxo de calor latente, ocorreu por que nesse dia não houve chuva e também em dias antes, porém nesse dia ocorreu uma grande nebulosidade, já o dia 31/05/11 foi um dia com maior incidência de radiação, por isso os maiores valores dos componentes do balanço de energia.

Grimmond e Oke (1995), analisando os fluxos de energia, no subúrbio de quatro cidades norte-americanas observaram que pico diário do fluxo de calor sensível ocorre ao mesmo tempo, com a radiação às 12h, exceto em Tucson, onde ocorre uma hora mais tarde. O valor médio do fluxo de calor sensível diário foi maior em Tucson (292 W m^{-2}), Chicago (215 W m^{-2}), Los Angeles (212 W m^{-2}) são similares, já em Sacramento (202 W m^{-2}) menor.

Cui et al. (2012), estudando o balanço de energia em diferentes áreas na cidade de Pequim, obtiveram valores de médios anuais de saldo de radiação de $35,8 \text{ W m}^{-2}$, fluxo de calor sensível de $31,25 \text{ W m}^{-2}$, para uma área de parque verde.

4.1.4 Componentes do balanço de radiação

A variação média diária do balanço de radiação para uma área gramada, para o período compreendido entre 19 de abril a 26 de julho de 2011 em Recife-PE, é apresentada na figura 20.

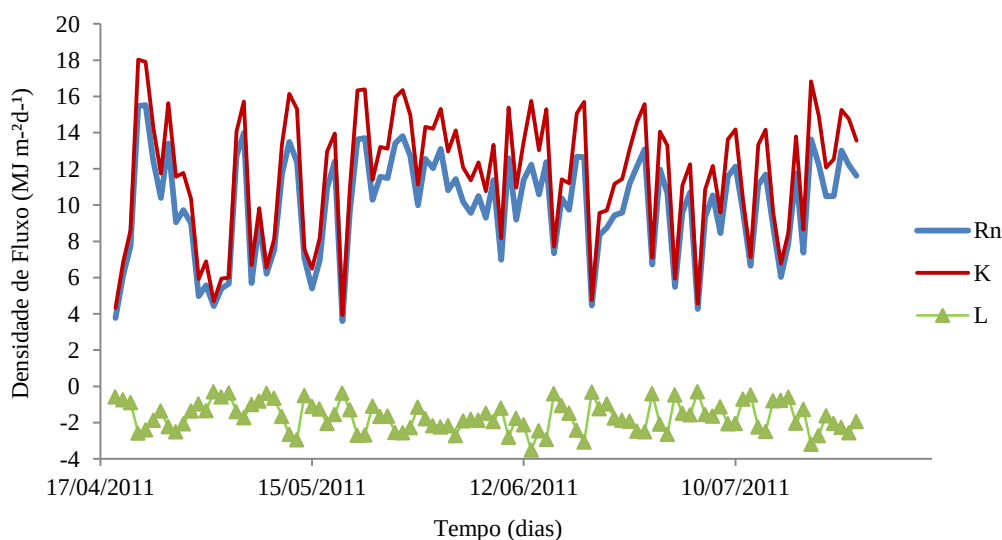


Figura 20. Componentes do balanço de radiação, para o período de 19 de abril a 26 de julho de 2011, em área gramada, Recife-PE.

Para o período analisado o valor máximo e mínimo do balanço de radiação de ondas curtas (K) foi de 17,81 e 3,83 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para os dias 22/04/2011 e 19/05/2011, respectivamente. A média para o período foi de 11,55 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ com um desvio padrão de 3,47 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Silva et al. (2011), analisando o balanço de radiação no semiárido brasileiro, obtiveram valores médios diários para o balanço de ondas curtas no período analisado de 15,5 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ com desvio padrão de 3 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Nesse período foram observados alguns dias com alta nebulosidade e registro de precipitação, interferindo na quantidade de radiação que chega a superfície terrestre.

O balanço de radiação de ondas longas (L) apresentou valor médio de -1,7 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, sendo o maior valor registrado no dia 05/07/2011 e menor valor no dia 13/06/2011 com, -0,3 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ e -3,55 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, respectivamente. Os valores diários do balanço de radiação de ondas longas (L) para o período estudado foram sempre negativos devido à radiação de ondas longas emitida pela superfície ser maior que a radiação de ondas longas emitida pela atmosfera. Souza Filho et al. (2006), analisando o

balanço de ondas longas na Amazônia encontraram valores médios de $-1,4 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ para um período chuvoso e $-2,8 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ para o período menos chuvoso.

A Figura 21 mostra a variação diária do albedo para o período estudado. O valor médio diário para todo o período foi 17,9 %. A amplitude do albedo de superfície é de 7,1 % durante os dias analisados.

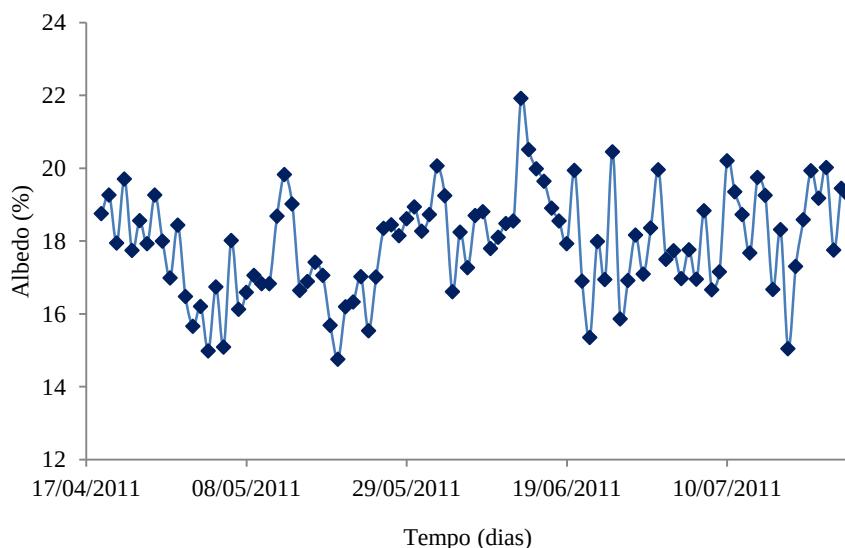


Figura 21. Variação média diária do albedo, em área gramada, Recife-PE.

Pode-se observar uma variabilidade na distribuição do albedo na área gramada, onde o menor valor foi de 14,76% e o maior valor foi de 21,92 % para os dias 20/05/2011 e 13/06/2011, respectivamente. Esses valores ocorreram devido ao primeiro dia ter sido um dia sem nebulosidade de céu claro, já o segundo dia ter sido um dia com grande nebulosidade e chuvoso. No período analisado ocorreu grande registro de precipitação e dias nublados, também ao efeito da vegetação encontrada na área, promovendo assim a variabilidade na refletividade. Souza Filho et al. (2006), analisando o albedo de superfície na Amazônia, encontraram valores médios de 8,2% para um período chuvoso e 11,9% para o período menos chuvoso fato que pode ser explicado pela maior alternância do estado de molhamento do dossel.

A figura 22 apresenta a variação horária dos componentes do balanço de radiação para dias representativos do período analisado.

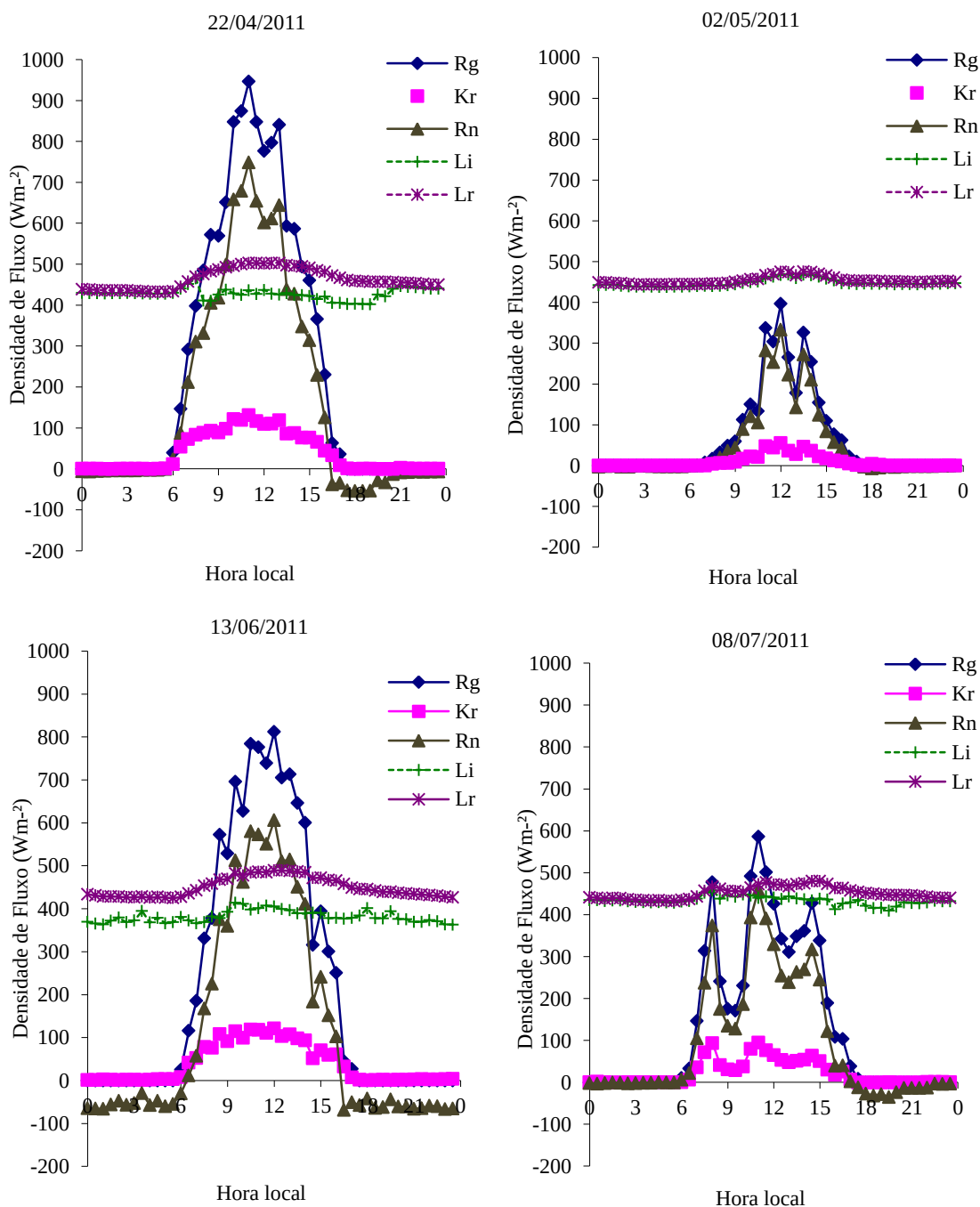


Figura 22. Variação média horária dos componentes do balanço de radiação, em área de gramado, Recife-PE.

Os valores máximos dos componentes do balanço de radiação, radiação solar global (Rg), radiação solar refletida (Kr), saldo de radiação (Rn), radiação de ondas longas emitida pela atmosfera (Li) e radiação de ondas longas emitida pela superfície (Lr), que ocorreram no dia 22/04/2011, foram 947; 131; 749; 469 e 503 W m^{-2} , respectivamente. Para o dia 02/05/2011 os valores máximos de Rg, Kr, Rn, Li, Lr, foram de 397; 44; 333; 469 e 475 W m^{-2} , respectivamente. Observa-se a grande

diferença entre os valores máximos entre esses dois dias, que se deve a grande presença de nebulosidade para o dia 02/05, bem como o registro de um grande volume de precipitação (80 mm), já o dia 22/04 se apresenta como um dia parcialmente nublado. Comportamento semelhante ao dia 22/04/2011 ocorreu no dia 13/06/2011, e ao dia 02/05/2011 que foi um dia com chuva, também ocorreu em 08/07/2011.

Essa variabilidade nos valores diários da radiação solar incidente ocorre devido aos dias 22/04 e 13/06 serem dia com céu claro e o dia 02/05 ter sido um dia chuvoso e totalmente nublado e o dia 08/07 ter sido um dia parcialmente nublado, comportamentos que influenciam na quantidade de radiação que chega a superfície, e também na quantidade de radiação emitida pela superfície.

Machado (2011) analisando o balanço radiativo em São Paulo para um setor com pouca ou sem vegetação a taxa de resfriamento radiativo oscila entre 40 e 80 W m⁻², durante o período diurno e o período noturno, respectivamente, para outro setor, densamente arborizado, esta mesma taxa de resfriamento permanece aproximadamente constante, em torno de 60 W m⁻², independentemente do ciclo diurno e noturno.

4.2 Resultados para a área de asfalto

4.2.1. Variáveis Climáticas

Na figura 23 é apresentada temperatura média e umidade de ar na cidade de Recife-PE, na área com cobertura asfáltica para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011. Foi observado que o mês de agosto teve os menores valores médios de temperatura marcando 24°C, o menor valor médio foi 22°C no dia 06/08/2010, sendo esse também o menor valor para todo o período analisado. O mês de maior temperatura média mensal foi março, medindo 28°C, porém a maior temperatura média diária ocorreu em dezembro dia 12/01/2010 com 30 °C. A temperatura média para todo período analisado na cidade de Recife é de 27°C.

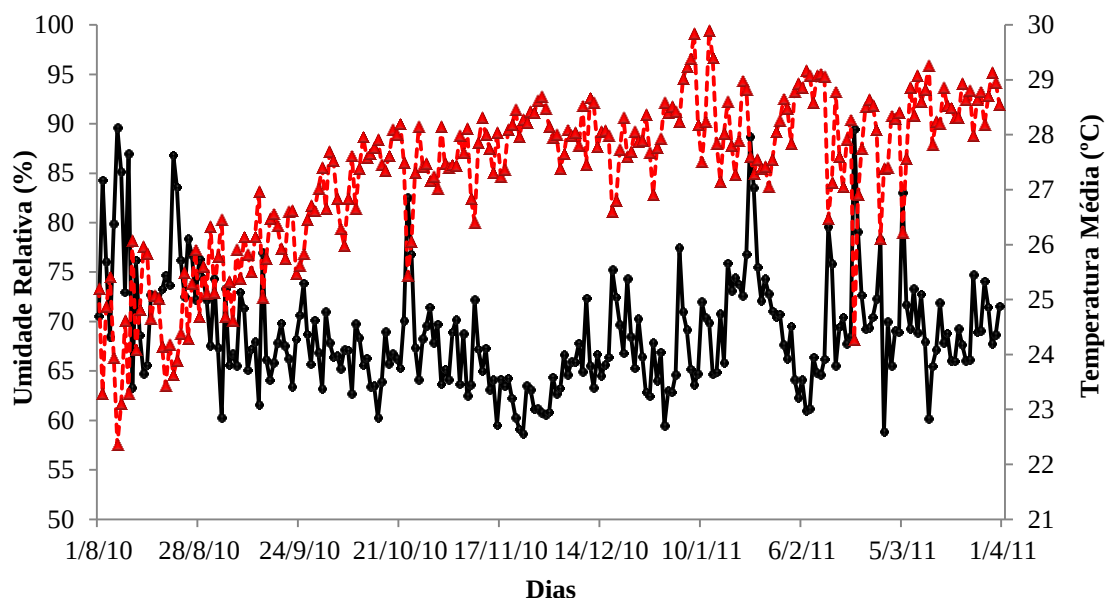


Figura 23. Temperatura média do ar e umidade de ar na cidade do Recife-PE, (asfalto) para o período 01/08/2010 a 31/03/2011.

Para a umidade relativa do ar, pode-se observar uma pequena variabilidade no comportamento da umidade relativa no período analisado, onde maior parte dos dias a umidade relativa do ar obteve valores menores que 70 %, apenas no mês de agosto e fevereiro, os quais tiveram registro de chuva, há uma variabilidade nos valores da umidade e da temperatura.

A média da umidade relativa para todo período analisado é de 69%. Já o menor valor médio diário ocorreu em 28/02/2011 de 59% e a maior média diária de umidade relativa do ar ocorreu em 06/08/2010 com valor de 90%, o mês de agosto foi também o mês com maior média mensal de umidade relativa, com 75%, já o mês com menor média mensal foi novembro, com 64% de umidade relativa do ar. Em novembro a temperatura média mensal foi de 28 °C.

A figura 24 apresenta a precipitação pluviométrica diária para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011. Nessa pode-se observar a variabilidade espacial da chuva, onde os maiores volumes foram registrados nos meses agosto de 2010 e fevereiro de 2011 com 186,4 mm e 301 mm, respectivamente. O total precipitado para o período analisado foi de 927,1 mm. O maior evento chuvoso ocorreu dia 12/2/2011 com 97,4 mm.

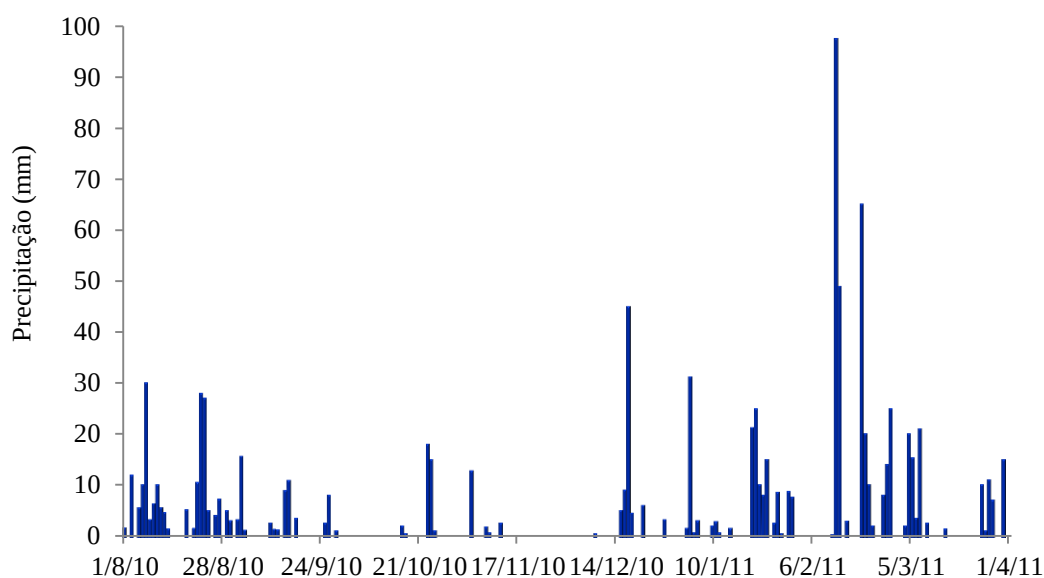


Figura 24. Precipitação diária em área urbana na cidade do Recife para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011.

A figura 25 apresenta a velocidade do vento para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011. A velocidade do vento para variou entre 0,51 m s⁻¹ a 1,93 m s⁻¹, nos dias 22/10/2010 e 07/02/2011, respectivamente.

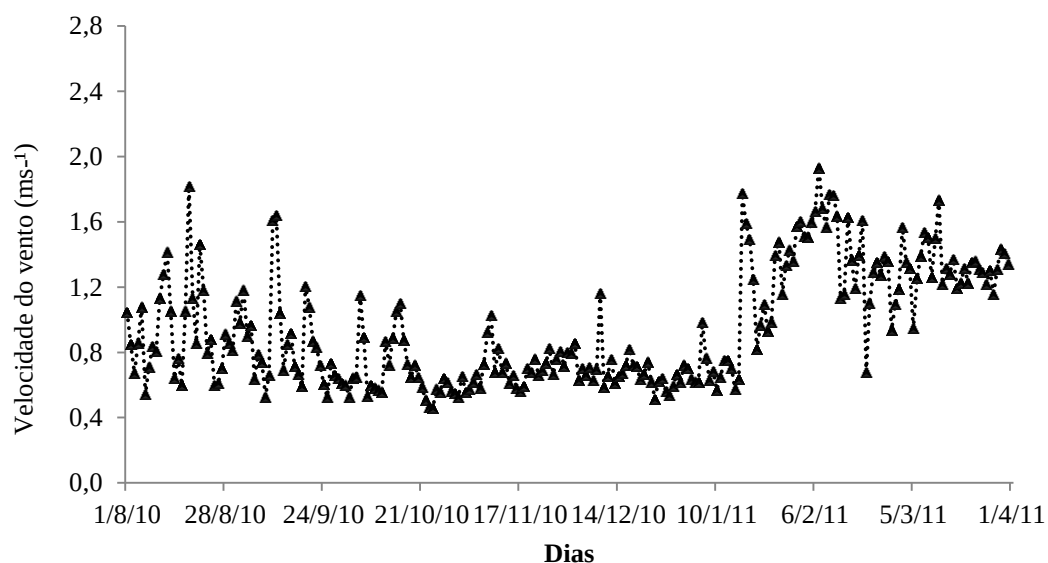


Figura 25. Velocidade do vento em área urbana na cidade do Recife para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011.

Observou-se também que os maiores valores foram registrados nos meses de fevereiro e março, com valores maiores que $1,0 \text{ m s}^{-1}$. Para o período com menor velocidade de vento os valores foram abaixo de $0,8 \text{ m s}^{-1}$.

4.2.2 Componentes do balanço de energia

Na figura 26 é apresentada a variação diária da razão entre o saldo de radiação e a radiação global, e entre o saldo de radiação e os fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G), em Recife em área com cobertura asfáltica, no período de 01/08/2010 a 31/03/2011.

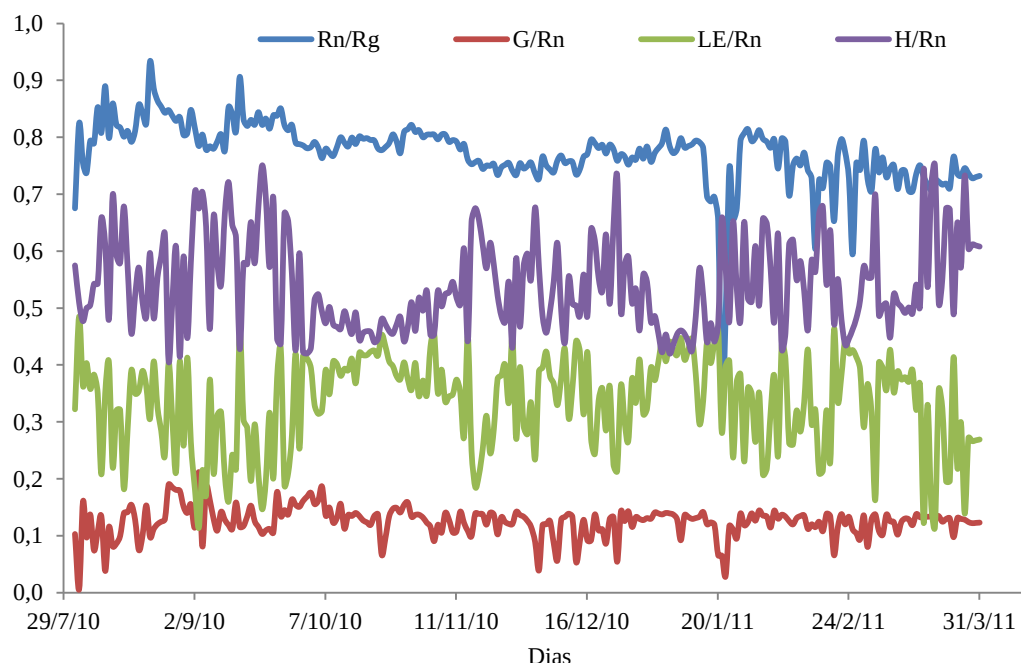


Figura 26. Variação diária da razão entre a radiação global e o saldo de radiação, entre o saldo de radiação e os fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G), em Recife (asfalto) no período de 01/08/2010 a 31/03/2011.

Observa-se que a porção da radiação solar global (R_g) utilizada pelo saldo de radiação (R_n), apresenta uma distribuição regular com um valor médio de 0,77 com o valor máximo de 0,93 dia 21/08/2010.

A fração do saldo de radiação (R_n) foi utilizado em sua maior parte, como fluxo de calor sensível (H), com valor máximo de 0,78 no dia 24/12/2010 e valor mínimo de 0,41 no dia 26/08/2010. Já partição entre o saldo de radiação e o fluxo de calor latente (LE/R_n), foi de 0,48 no dia 02/08/2010 valor máximo e de 0,12 no dia 16/03/2010 sendo o valor mínimo. Para a porção do saldo de radiação utilizada pelo fluxo de calor no solo o maior e menor valor foi 0,19 no dia 06/10/10 e 0,01 no dia 02/08/2010.

Vários trabalhos com balanço de energia em área urbana, concluem que o maior percentual de saldo de radiação é transformado em fluxo de calor sensível (Ferreira et al., 2012; Machado, 2011; Offerle et al., 2006)

Segundo Maitelli (2009) em Cuiabá - MT o comportamento médio diurno da fração de saldo de radiação usada como suporte dos fluxos de calor sensível evidenciou que durante o período diurno, em média, 20 a 52% da energia disponível era utilizada para aquecer o ar. Os dois fluxos, de calor sensível e de calor latente foram igualmente importantes.

O comportamento da evolução diária da radiação global (Rg), do saldo de radiação (Rn) e dos fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G), em área com cobertura asfáltica em Recife-PE, para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011, é apresentada na figura 27. Pode-se observar que as variações do saldo de radiação (Rn) seguiram as variações da radiação global (Rg).

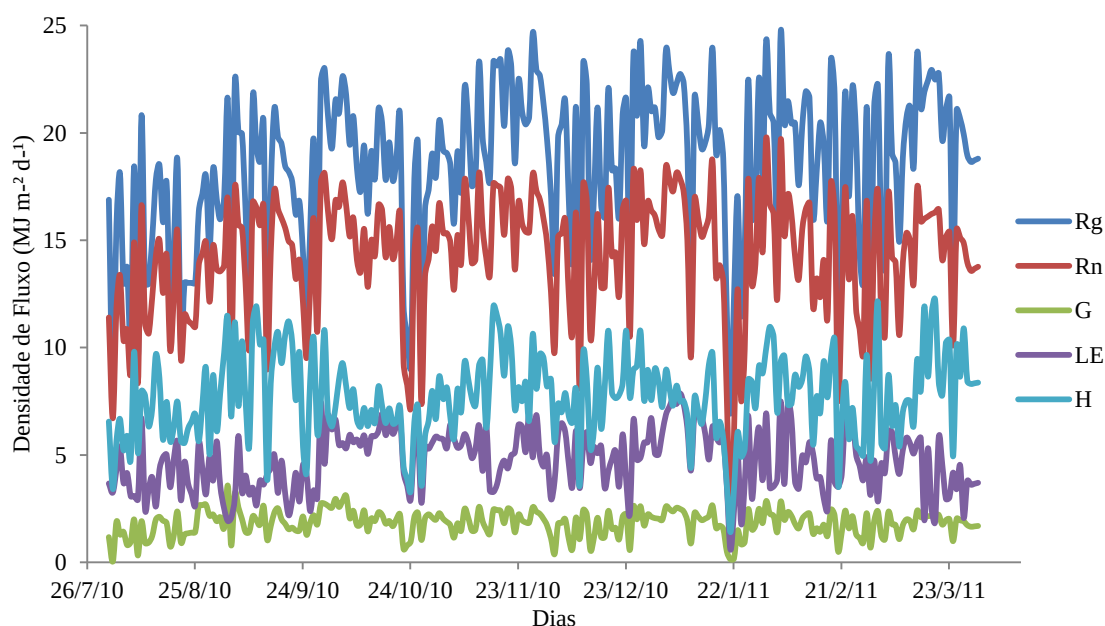


Figura 27. Evolução diária dos componentes do balanço de energia em área urbana (asfalto), em Recife-PE, para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011.

Observa-se, na figura 27, que os valores de radiação global variaram entre 3,68 e 24,72 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com valor médio de $18,51 \pm 3,67 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; os valores do saldo de radiação (Rn) variaram entre 1,42 e 19,76 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ com valor médio de $14,20 \pm 2,85 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, enquanto os valores do fluxo de calor latente (LE) variaram entre 0,68 e 10,32 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com um valor médio de $4,73 \pm 1,41 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Para o fluxo de calor sensível, os valores variaram entre 0,97 e 12,82 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ com valor médio de $7,73 \pm 1,96 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, sendo os maiores valores médios mensais, em setembro, novembro, dezembro e março com valores acima de 8,0 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Os valores de fluxo de calor no solo (G) apresentaram valores entre 0,04 e 3,57 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ com valor médio de $1,83 \pm 0,60 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Variação dos valores médios mensais dos fluxos de calor sensível e latente para cidade de Recife – área com solo coberto com asfalto é apresentada na figura 28.

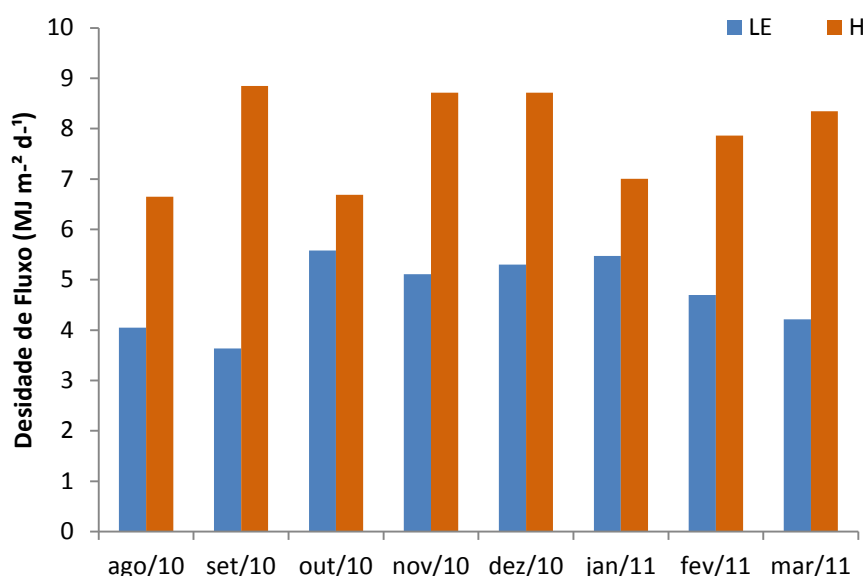


Figura 28. Variação dos valores médios mensais dos fluxos de calor latente e sensível em Recife-PE (área coberta com asfalto) em 2010/2011.

Observa-se que o fluxo de calor latente apresenta um valor máximo de $5,58 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ no mês de outubro de 2010 e um valor mínimo de $3,64 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ no mês de setembro. Para o fluxo de calor sensível o valor máximo de $8,85 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ no mês de setembro de 2010 e valor mínimo de $6,65 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ no mês de agosto de 2010.

Os maiores valores de fluxo de calor sensível, não coincidem com o mesmo período de valor máximo de saldo de radiação, mas está ligado a variabilidade climática ocorridas nestes meses.

A variabilidade em alguns meses do fluxo de calor sensível se dá em razão de variações na disponibilidade de energia incidente devido a variabilidade espacial e temporal da nebulosidade, ocorrida em alguns dias, influenciando na distribuição entre os componentes do balanço de energia.

Ferreira (2010) avaliando os fluxos de calor sensível e latente para a cidade de São Paulo observou que o fluxo de calor sensível é sistematicamente maior do que o fluxo de calor latente.

A evolução horária dos fluxos de energia em área urbana, em Recife/PE, para dias representativos na área com cobertura de asfalto é apresentada na figura 29. Observa-se na figura acima que em todos os dias, todos os componentes do balanço de

energia apresentam-se elevados, onde o fluxo de calor sensível é o principal componente do balanço de energia nos dias analisados.

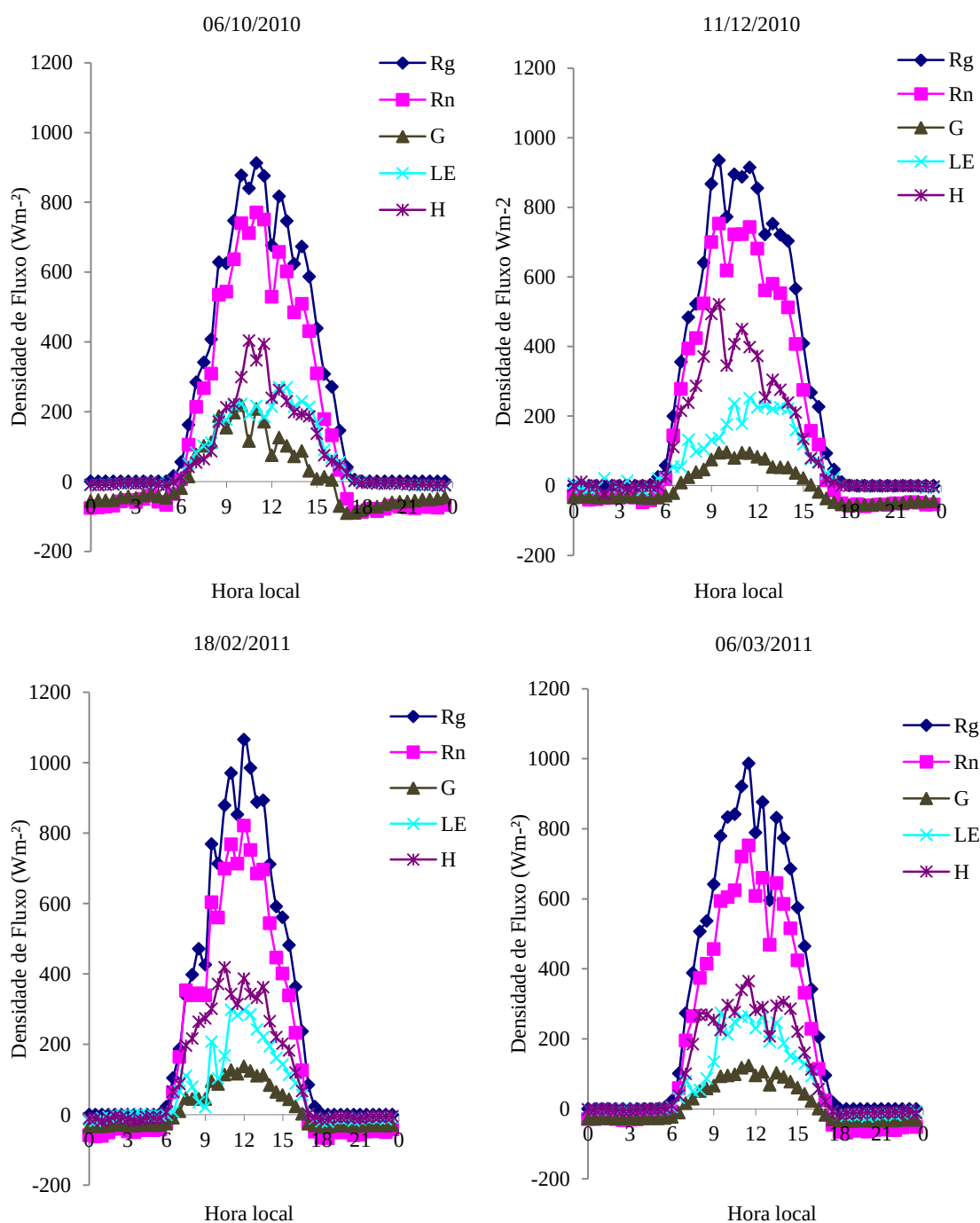


Figura 29. Evolução horária dos fluxos de energia em área urbana, Recife/PE (com cobertura de asfalto).

No dia 06/10/2010 a partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente foi de 38%, o fluxo de calor sensível foi de 43% e para o fluxo de calor no solo 19%,

nesse dia o maior valor de radiação ocorreu às 11h no valor de 912 W m^{-2} , e maior valor de fluxo de calor sensível de $403,9 \text{ W m}^{-2}$, às 10h30min. Os valores de fluxos de calor sensível e calor latente nesse dia têm um comportamento bem próximo um do outro, somente a partir de 9h30min que ocorre um aumento no valor do fluxo de calor sensível até 12h, em seguida retornado a valores próximos ao calor latente.

Para o dia 11/12/2010 novamente o principal componente do balanço de energia é o fluxo de calor sensível com 60% do saldo de radiação. Para esse dia o maior valor de saldo de radiação foi de 935 W m^{-2} e o maior valor de fluxo de calor sensível de 512 W m^{-2} ambos às 9h30min. No dia 18/02/2011 os valores máximos horários de saldo de radiação, fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível e fluxo de calor no solo foram de 1066 W m^{-2} , $297,7 \text{ W m}^{-2}$, 418 W m^{-2} e 137 W m^{-2} , respectivamente, entre as 10h30min e 12h. Pode-se observar que o comportamento do dia 06/03/2011 foi semelhante aos anteriores, nesse dia a partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente foi de 0,36 e fluxo de calor sensível foi de 0,51 e a partição do saldo de radiação em fluxo de calor no solo foi de 0,14. O maior valor do saldo de radiação foi de 987 W m^{-2} às 11h30min.

Todos os dias analisados na figura 29 foram dias de céu parcialmente nublado, contribuindo com a chegada de radiação solar na superfície. Sendo essa área de cobertura asfáltica e observando-se elevadas temperaturas (Figura 23), tem-se altos valores de fluxos de calor sensível, proporcionando uma maior quantidade de energia seja destinada ao aquecimento do ar, ou seja, utilizada no fluxo de calor sensível.

Maitelli (2009), analisando os componentes do balanço de energia em Cuiabá- MT, observou que fluxo de calor latente (LE) foi, em média, de 106 W m^{-2} com máximos de 216 W m^{-2} , equivalente a uma taxa de evapotranspiração de 0,16 mm/h e 0,32 mm/h, respectivamente; as taxas de calor sensível, em média, de 63 W m^{-2} com máximos de 121 W m^{-2} .

Cui et al (2012), estudando o balanço de energia em diferentes áreas na cidade de Pequim, obtiveram valores de médios anuais de saldo de radiação de $50,1 \text{ W m}^{-2}$, fluxo de calor sensível de $34,15 \text{ W m}^{-2}$ em um área de grandes construções.

4.2.3 Componentes do balanço de radiação

O balanço de radiação em área de cobertura asfáltica para o período de 30/07/2011 a 01/11/2011, em Recife-PE, é apresentado na figura 30. Na referida figura o valor médio diário para o saldo de radiação (R_n) foi de $12,25 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, para o balanço de radiação de ondas curtas (K) de $16,97 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e para o balanço de radiação de ondas longas (L) de $-4,74 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

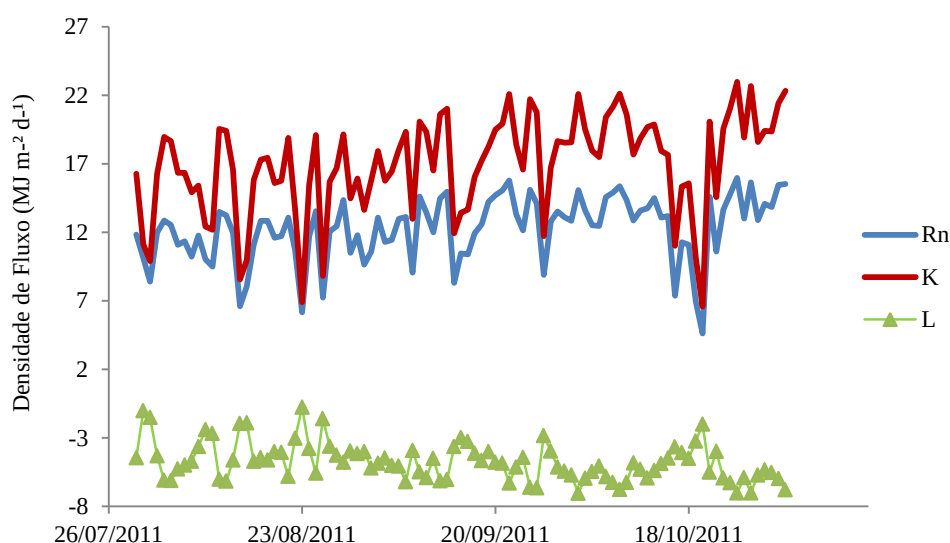


Figura 30. Componentes do balanço de radiação, para o período de 30/07/2011 a 01/11/2011, em área de asfalto, Recife-PE.

Os valores do balanço de radiação de ondas curtas (K) os valores máximo e mínimo foram de $22,96 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $6,59 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, nos dias 25/10/2011 e 20/10/2011, respectivamente. Já o saldo de radiação (R_n) obtiveram seu maior valor no dia 25/10/2011 de $15,95 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e menor valor dia 20/10/2011 de $4,61 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente. Para o balanço de radiação de ondas longas (L) o valor máximo foi de $-0,76 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ no dia 23/08/2011 e o valor mínimo foi $-7,04 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ no dia 01/10/2011.

A variação média diária do albedo de superfície, em área com cobertura asfáltica é apresentada na figura 31. A média diária do albedo foi de 11,6% para o período analisado, onde o maior valor do albedo ocorreu dia 04/08/2011 de 16,4% e menor valor do albedo ocorrendo dia 26/08/2011 de 9%.

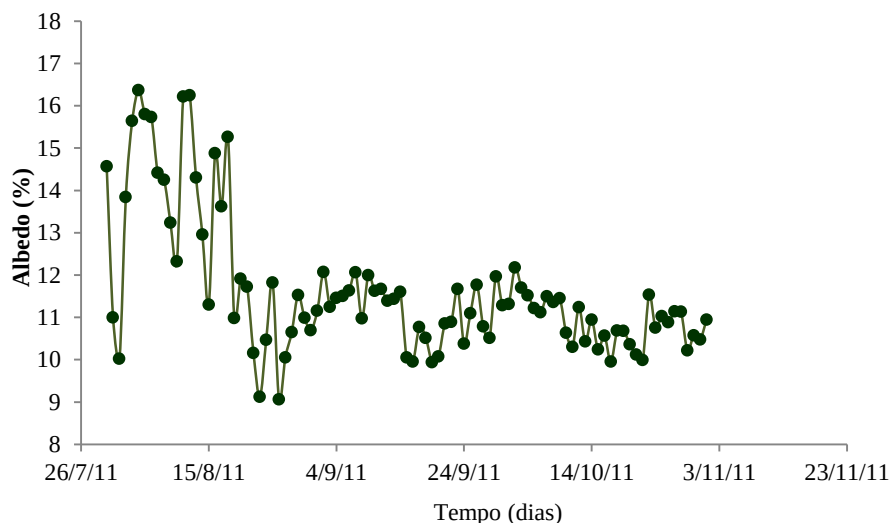


Figura 31. Variação média diária do albedo, em área de asfalto, Recife-PE.

Na figura 31 observa-se uma grande variabilidade para o período, onde os primeiros 20 dias os valores de albedo são bem maiores que a média do período, isso aconteceu por esses dias se encontrarem no final da estação chuvosa na região, momento em que a radiação incidente na superfície é menor devido à nebulosidade aumentando a radiação difusa e assim, promovendo a oscilação nos valores do albedo.

Bologun et al. (2009), ao estudarem o balanço de energia em área de subúrbio na cidade do Kansas em Missouri, Estados Unidos, obtiveram valores de albedo ao meio dia, para dia nublado e dia de céu claro de 25% e 24% respectivamente. Já Ferreira et al. (2012), estudando balanço de radiação em superfície na cidade de São Paulo no ano de 2004, obteve valores médios mensais de albedo, de 8% para o mês de junho e 10% para o mês de abril.

A Figura 32 apresenta a variação horária dos componentes do balanço de radiação para dias representativos do período analisado. É observado na figura 32 o comportamento dos componentes do balanço de radiação para dias representativos do período analisado, tem-se o dia 14/08/2011 com valores máximos de radiação solar global (R_g), radiação solar refletida (K_r), saldo de radiação (R_n), radiação de onda longa emitida pela atmosfera (L_i) e radiação emitida pela superfície (L_r) de 514 W m^{-2} , 60 W m^{-2} , 383 W m^{-2} , 443 W m^{-2} e 523 W m^{-2} , respectivamente. Com média diária de radiação solar global (R_g) de $13,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

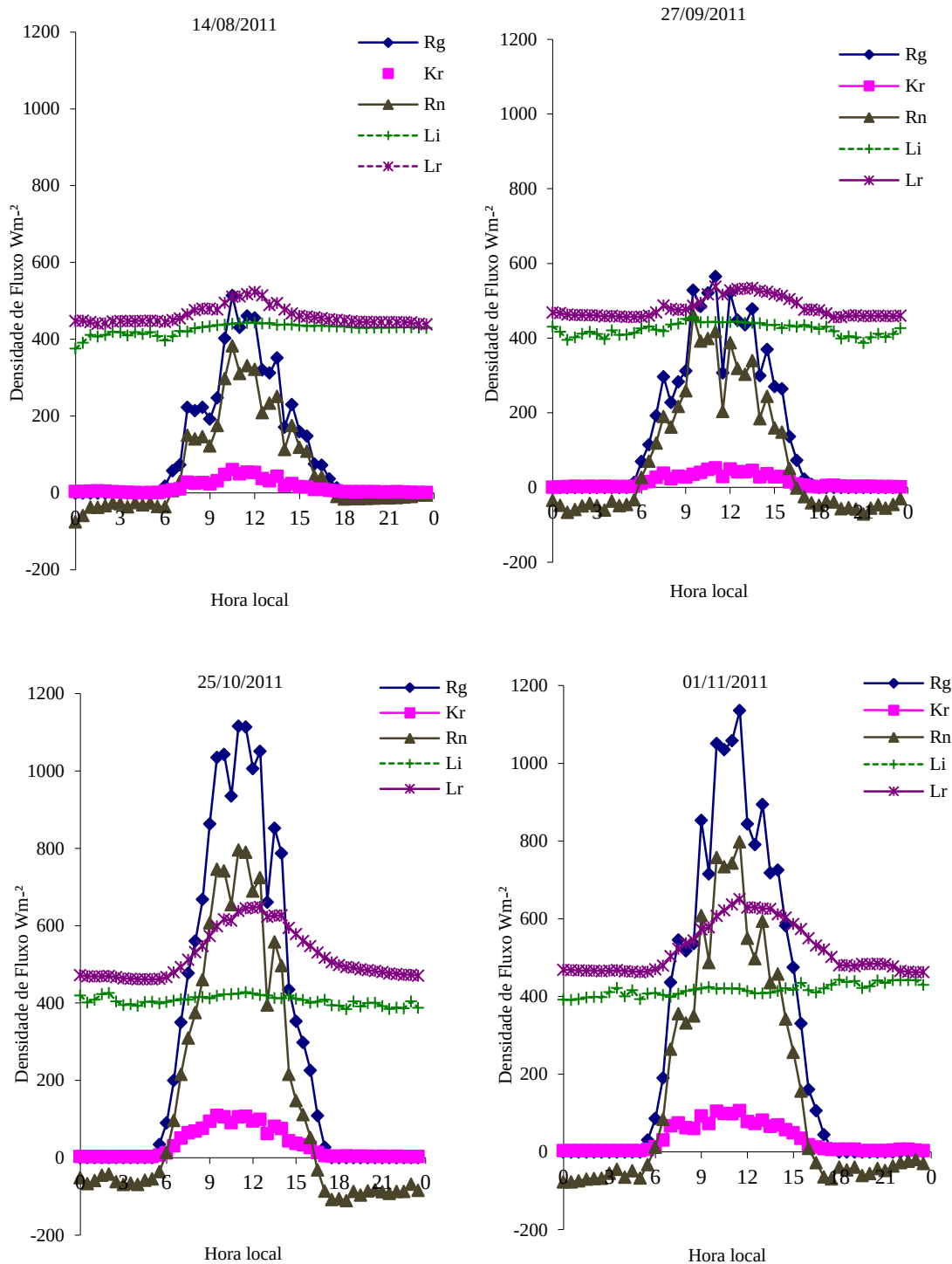


Figura 32. Variação média horária dos componentes do balanço de radiação, em área de asfalto, Recife-PE.

Para o dia 27/08/2011 o valor máximo de radiação solar global foi de 565 W m^{-2} às 11h, o valor máximo de radiação solar refletida foi $52,1 \text{ W m}^{-2}$ no mesmo horário, o saldo de radiação teve o seu valor máximo às 9h30min de $462,6 \text{ W m}^{-2}$, a radiação de onda longa emitida pela atmosfera teve valor máximo de 456 W m^{-2} e a radiação de

onda longa emitida pela superfície foi 538 W m^{-2} . A média diária da radiação solar global foi de $13 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

No dia 25/10/2011 a radiação solar global teve valor máximo de 1116 W m^{-2} e radiação solar refletida com valor máximo de 109 W m^{-2} , o saldo de radiação foi de 796 W m^{-2} às 11h e valores dos componentes do balanço de radiação de ondas longas emitidas pela atmosfera de 428 W m^{-2} e ondas longas emitidas pela superfície de 648 W m^{-2} . Para o dia 01/11/2011 os valores foram semelhantes ao dia anterior, com valores máximos de radiação solar global (Rg), radiação solar refletida (Kr), saldo de radiação (Rn), radiação de onda longa emitida pela atmosfera (Li) e radiação emitida pela superfície (Lr) de 1136 W m^{-2} , 106 W m^{-2} , 798 W m^{-2} , 443 W m^{-2} e 651 W m^{-2} , respectivamente. Os valores médios diários de radiação solar global para os dias 25/10 e 01/11 foi de $25,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $24,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Anandakumar (1999) observou durante o verão que o fluxo turbulento de calor sensível na cidade de Viena, Áustria, aumenta mais lentamente do que o saldo de radiação, atingindo o valor máximo diurno entre 13 e 14 h, logo após o saldo de radiação atingir o valor máximo. Além disso, quando a defasagem entre o fluxo de calor sensível e o saldo de radiação é máxima, observa-se que a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura da superfície atinge o valor máximo.

4.3 Resultados para a área de gramado versus asfalto

4.3.1 Variáveis climáticas na área de gramado versus asfalto

Na figura 33 é apresentada a temperatura do ar para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011, em Recife, para uma área de gramado e outra área com cobertura asfáltica. Observa-se que na maior parte dos dias, o mesmo comportamento da temperatura do ar nas duas áreas analisadas.

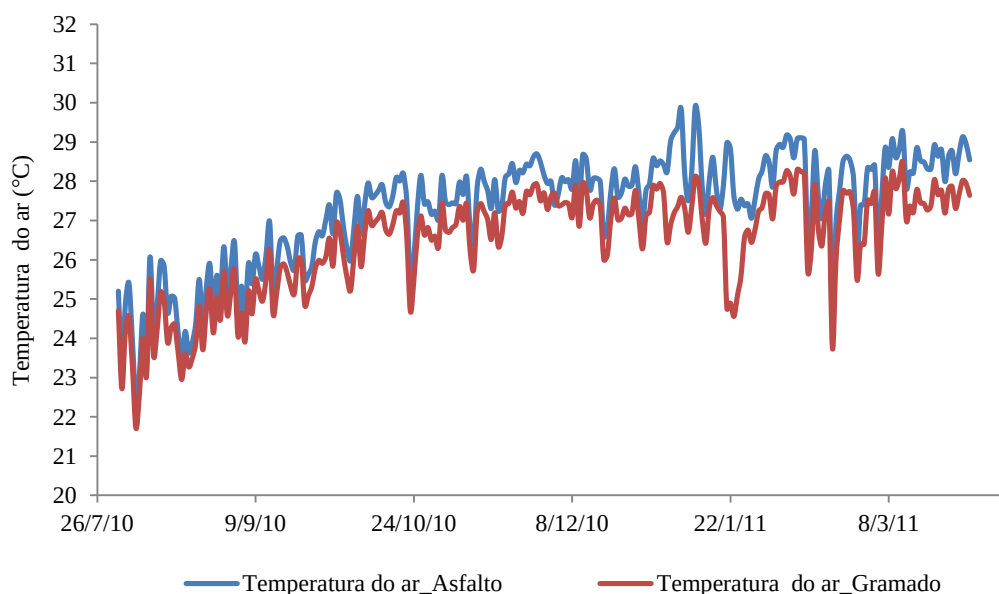


Figura 33. Temperatura do ar diária em Recife, para uma área de gramado e área com cobertura asfáltica, para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011.

O valor médio da temperatura do ar no período analisado foi de 27,39°C para área de asfalto e de 26,48°C para a área de gramado, a temperatura máxima na área de asfalto e de gramado ocorreu dia 12/01/2011 e 12/03/2011 com valores de 29,91°C e 28,47°C, respectivamente. Os valores mínimos de temperatura do ar para o período analisado na área de gramado e asfalto ocorreu no dia 06/08/2010 para as duas áreas, nos valores de 21,71°C e 22,35°C, respectivamente.

A amplitude térmica média para o período analisado foi de 0,81°C, o dia em que ocorreu a maior amplitude foi 05/01/2011 no valor de 2,13°C. A pequena diferença da temperatura entre o asfalto e grama se deve aos meses de agosto e setembro terem menores temperaturas influenciando na média geral do período. Em 21/1/2011 ocorreu a maior diferença entre as duas áreas devido a esse dia, bem como dias após ter ocorrido

registro de precipitação, sendo o acumulado de 69,3 mm, entre 21 a 25/01/2011, assim, a área com gramado ficando com um temperatura mais baixa devido a quantidade de água no solo.

Na figura 34 é apresentada a umidade relativa para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011, em Recife, para uma área de gramado e área com cobertura asfáltica.

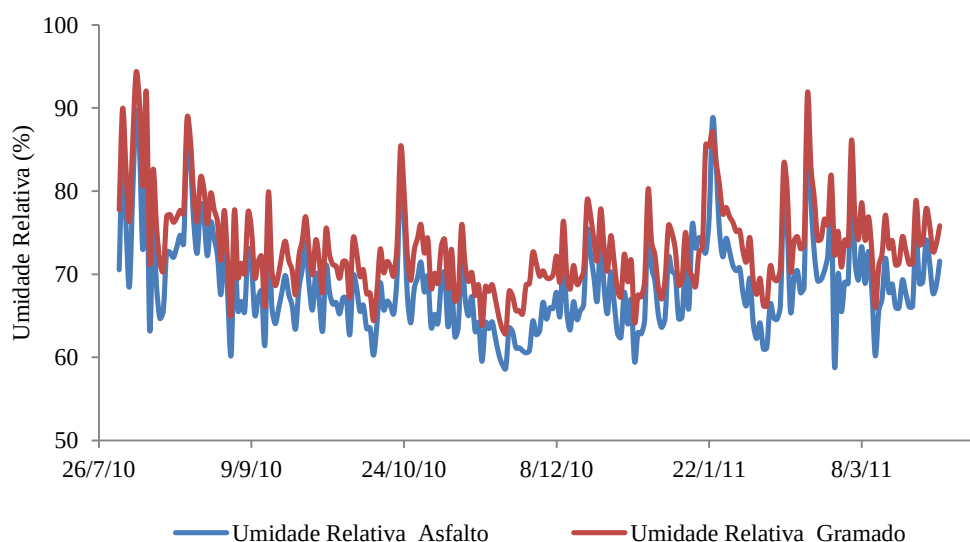


Figura 34. Umidade relativa diária em Recife, para uma área de gramado e área com cobertura asfáltica, para o período de 01/08/2010 a 31/03/2011

A média da umidade relativa para todo período analisado na área de gramado e asfalto foram de 73% e 69%, respectivamente. Já o menor valor médio diário para o asfalto ocorreu em 28/02/2011 de 59% e na área de gramado dia 23/11/2010 de 63 %. A maior média diária de umidade relativa do ar no asfalto e no gramado ocorreu em 06/08/2010 com valores de 90% e 94%, respectivamente, o mês de agosto foi também o mês com maior média mensal de umidade relativa, para área de asfalto com 75%, já o mês com menor média mensal foi novembro, com 64% de umidade relativa do ar.

4.3.2. Análise dos fluxos de calor latente e calor sensível para gramado e asfalto

Analisando-se os dados da tabela 3, constata-se que, em termos de saldo de radiação médio mensal, o mês de novembro foi o período que apresentou o maior valor de 15,86 e 13,52 MJ m⁻² d⁻¹, para área de asfalto e grama, respectivamente, ao passo que em agosto foi o período em que o saldo de radiação teve o menor valor de 12,23 e 8,76 MJ m⁻² d⁻¹, para asfalto e grama, respectivamente. A diferença entre os valores se deve

possivelmente ao posicionamento dos sensores e das características de cada área e a variabilidade espacial e temporal das nuvens.

Tabela 3. Totais mensais médios do saldo de radiação, fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível para as áreas estudadas em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Meses	Rn_asfalto	Rn_gramado	LE_asfalto	LE_gramado	H_asfalto	H_gramado
Agosto /10	12,23	8,76	4,05	2,62	6,65	4,91
Setembro /10	14,46	11,37	3,64	3,09	8,85	6,82
Outubro /10	14,30	11,56	5,58	4,08	6,69	5,82
Novembro /10	15,86	13,52	5,28	5,61	8,59	5,85
Dezembro /10	14,50	11,93	4,91	4,35	7,92	5,91
Janeiro /11	14,31	12,01	5,47	5,42	7,00	5,09
Fevereiro /11	14,37	12,58	4,69	5,21	7,86	6,39
Março /11	14,37	8,82	4,22	3,02	8,35	4,57

O fluxo de calor sensível é predominante durante todo o período analisado, para o asfalto e também na área de grama, exceto para o mês de janeiro na área gramada, onde o fluxo de calor latente foi pouco maior em relação ao fluxo de calor sensível, por ter ocorrido registro de precipitação, provocando um aumento de vapor d'água no meio que interfere na partição dos fluxos. Ferreira (2010), analisando os componentes do balanço de energia em São Paulo, encontrou para o mês de novembro o valor de $5,54 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ de fluxo de calor sensível e $2,66 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ de fluxo de calor latente.

O mês com maior valor de fluxo de calor sensível para área de asfalto ocorreu em setembro ($8,85 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), mês com índice pluviométrico (59,7 mm). O valor de fluxo de calor sensível médio para os meses analisados foi de $7,74 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, para o fluxo de calor sensível o valor médio total foi de $5,67 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Grimmond e Oke (1995), analisando os fluxos de energia, no subúrbio de quatro cidades norte americanas observaram que o fluxo de calor sensível e calor latente médio para o período analisado foi de $7,49 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ e $4,16 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ em Tucson, $4,92 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ e $3,68 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ em Sacramento, $4,16 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ e $4,80 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ Chicago e $5,43 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ e $3,94 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ em Los Angeles, respectivamente.

4.4 Análise estatística da estimativa do saldo de radiação para área de gramado e de asfalto

Na Figura 35 são apresentadas as relações entre o saldo de radiação e a radiação global medidos na área em estudo, localizada em Recife-PE, durante um trimestre, de agosto a outubro, do ano de 2010, na a área de gramado (Figura 35a) e área asfáltica (Figura 35b).

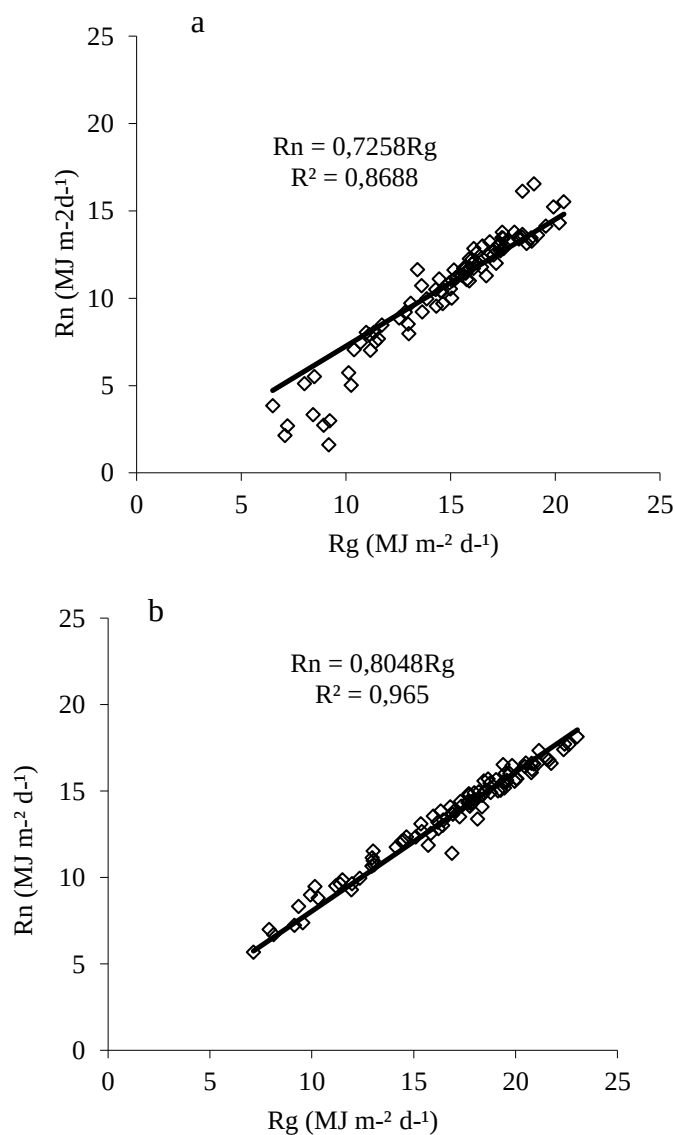


Figura 35. Relação entre o saldo de radiação (R_n) e a radiação solar global (R_g) para a área de gramado (a) e área de asfalto (b), no período de 01/08/2010 a 31/10/2010, em Recife-PE.

Percebe-se uma dispersão semelhante dos dados para as duas superfícies, os coeficientes angulares encontrados apresentam valores de 0,7258 e 0,8048,

respectivamente. Os demais parâmetros estatísticos calculados nesse período estão mostrados na tabela 4.

Na figura 35 observa-se um elevado coeficiente de determinação, R^2 , de 0,8688 e 0,965, para a relação entre os valores diurnos de R_g e R_n para área de gramado (Figura 35a) e área asfalto (Figura 35b), respectivamente.

Após se obter as equações de regressão para o gramado ($R_{n_{estimado}} = 0,7258 \cdot R_g$) e para o asfalto ($R_{n_{estimado}} = 0,8048 \cdot R_g$), foram obtidos valores diários de R_n para o gramado e asfalto durante os períodos de 01/11 a 31/12/2010 (período seco) e 01/02 a 30/03/2011 (período úmido).

Tabela 4. Parâmetros estatísticos calculados para as equações de regressão linear utilizadas na estimativa do saldo de radiação sobre superfície gramada e superfície asfáltica, em função da radiação solar global para Recife- PE.

Períodos	RQME	d	r	c	Desempenho
Grama	1,182122	0,955349	0,89	0,85	Muito Bom
Grama seco	0,793262	0,968518	0,925	0,90	Ótimo
Grama úmido	1,373986	0,958534	0,881	0,84	Muito Bom
Asfalto	0,533295	0,991746	0,984	0,98	Ótimo
Asfalto seco	0,909686	0,977871	0,981	0,96	Ótimo
Asfalto úmido	1,830344	0,986709	0,865	0,85	Muito Bom

De acordo como critério de análise de desempenho pelo índice "c", proposto por Camargo e Sentelhas (1997), os parâmetros avaliados foram classificados na categoria de desempenho estatístico "ótimo" ($c > 0,85$) e "muito bom" (0,76 a 0,85). Resultados semelhantes foram obtidos por outros autores (Silva et al., 2007; Heldwein et al., 2012).

A partir dos resultados encontrados para o índice de desempenho, foi realizada a estimativa do R_n em função do R_g em dois períodos distintos, seco e úmido, nos meses subsequentes e nas duas áreas em estudo. Os resultados estão mostrados nas Figuras 36 e 37, respectivamente.

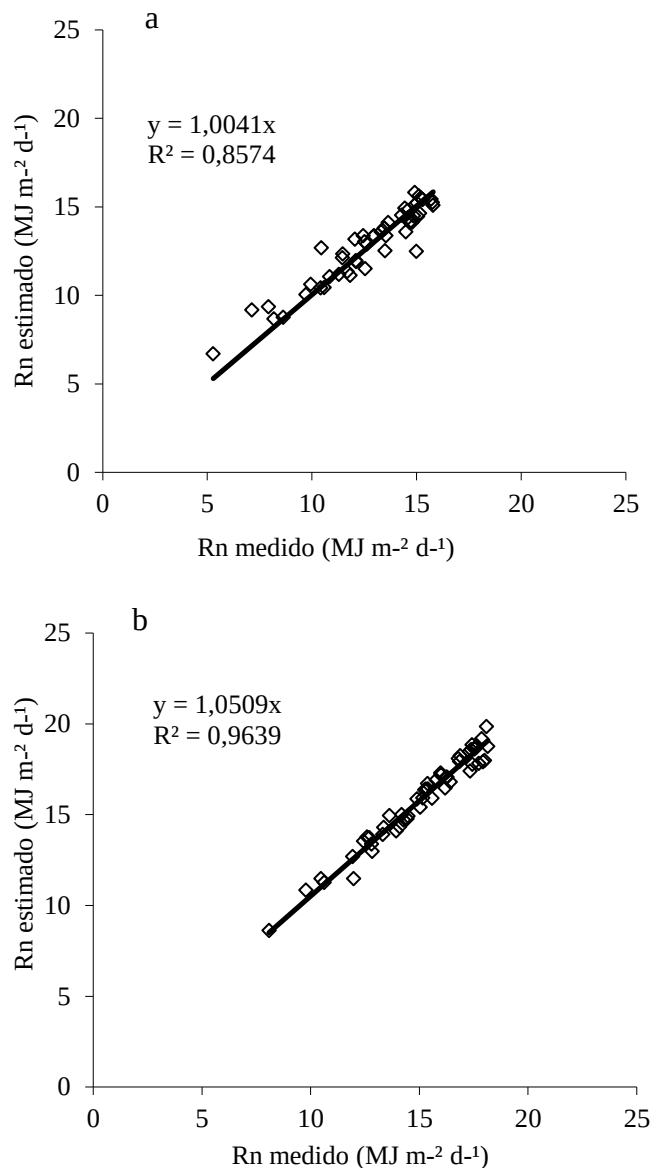


Figura 36. Comparação dos valores diários de R_n medido e estimado em função da R_g para o período seco nas áreas de gramado (a) e asfalto (b) em Recife-PE.

Pode-se verificar que os resultados encontrados para os coeficientes angulares em cada situação é muito próximo à unidade, mostrando uma boa relação entre os valores estimados com os medidos para o saldo de radiação nas áreas em estudo, nos períodos analisados.

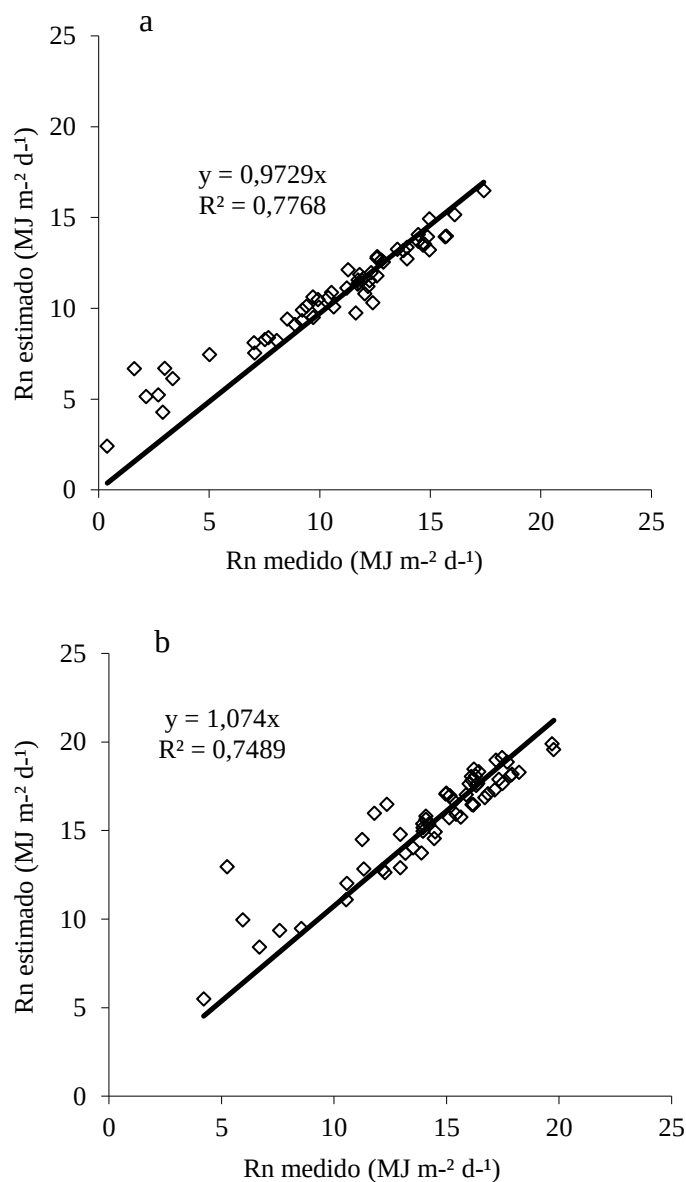


Figura 37. Comparação dos valores diários de R_n medido e estimado em função da R_g para o período úmido nas áreas de gramado (a) e asfalto (b) em Recife-PE.

Os resultados encontrados para os parâmetros estatísticos, mostrados na Tabela 4, confirmam a concordância dos valores apresentados, ou seja, indicam haver uma relação linear adequada entre os valores medidos e estimados.

5. Conclusões

- Na área de gramado, o fluxo de calor sensível (H) é o termo dominante durante todo o período analisado, onde H corresponde a 49% do saldo de radiação, para período úmido e seco, os valores foram 48% e 51%, respectivamente. O fluxo de calor latente (LE) durante todo o período corresponde a 40% do saldo de radiação, o mesmo valor ocorreu para o período úmido (40%), para o seco a partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente corresponde a 36%. O fluxo de calor no solo (G) durante todo o período e para o período úmido corresponde a 11% do saldo de radiação. Durante o período seco o fluxo de calor no solo superou a média total, correspondendo a 14% do saldo de radiação.

- Na área de asfalto a radiação global transformada em saldo de radiação foi de 77%, sendo que o saldo de radiação foi utilizado em média, como 54% no fluxo de calor sensível, 33% como fluxo de calor latente e 13% como o fluxo de calor no solo.

- A combinação dos componentes do balanço de radiação indicou que o saldo de radiação foi 18,3% maior na área asfaltada do que na área gramada, refletindo o efeito de suas propriedades radiométricas. Os componentes do balanço de radiação para o período analisado na área de gramado teve valores médios de $10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $11,66 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $-1,66 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, para o saldo de radiação, o balanço de radiação de ondas curtas e o balanço de radiação de ondas longas, respectivamente. Para a área de asfalto o saldo de radiação, balanço de ondas curtas e balanço de ondas longas os valores foram de $12,24 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $16,98 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $-4,74 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente.

- A variação do albedo para área de gramado foi de 7,1% com valor médio para o período analisado de 17,93%. Para a área de asfalto a variabilidade foi de 7,3% com média de 11,61% na cidade de Recife em 2011.

- Análise da relação saldo de radiação e radiação global mostra que o saldo de radiação em superfície gramada e superfície asfáltica, pode ser estimado satisfatoriamente a partir da radiação solar global na cidade de Recife, com a necessidade de se considerar suas variações sazonais.

6. Bibliografia

ABREU, L.; SOUZA, N.; TEIXEIRA, M. (2007). A influência da urbanização como fator de alteração de temperatura na cidade de Teresina-PI. In: II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, **Anais...** João Pessoa - PB – 2007.

ALVES, E. D. L.; SPECIAN, V. Estudo do Comportamento Termohigrométrico em Ambiente Urbano: Estudo de Caso em Iporá-GO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.02, p.87-95, 2010.

AYOADE, J. O. **Introdução a climatologia para os trópicos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

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.

ARAÚJO, B. C. D. de; CARAM, R. Análise ambiental: estudo bioclimático urbano em centro histórico. **Ambiente & Sociedade**, v. 9, n. 1, jan./jun. 2006.

ARNFIELD, A. J. Two Decades Of Urban Climate Research: A Review Of Turbulence, Exchanges Of Energy and Water, and the Urban Heat Island. **International Journal of Climatology**, v.23, p.1-26, 2003.

BALOGUN, A. A.; ADEGOKE, J. O.; VEZHAPPARAMBU, S.; MAUDER, M.; MCFADDEN, J. P.; GALLO, K. Surface Energy Balance Measurements Above an Exurban Residential Neighbourhood of Kansas City, Missouri. **Boundary-Layer Meteorology**, v.133, p.299–321, 2009

BARRADAS, V. L.; TEJEDA-MARTINEZ, A.; JAUREGUI, E. Energy balance measurements in a suburban vegetated area in Mexico City. **Atmospheric Environment**, v. 33, p.4109-4113, 1999.

BARBIRATO, G. M. Modelo de balanço de energia aplicado ao caso da cidade de Maceió – AL, e suas implicações para o planejamento urbano. **Revista FÓRUM - Clima Urbano e Planejamento das Cidades**, v. 3, n. 2, 2009.

BEST, M. J.; GRIMMOND, C. S. B.; VILLANI, M. G. Evaluation of the urban tile in moses using surface energy balance observations. **Boundary-Layer Meteorology**, v.118, p.503–525, 2006.

BORGES, C. J. R.; AZEVEDO, P. V. DE; SILVA, V. DE P. R. da; CAMPOS, J.H. B. DA C. ; MOURA, M. S. B. de; SOARES, J. M.; SILVA, B. B. da. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.4, p.393–399, 2008.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CHRISTEN, A.; VOGT, R. Energy and radiation balance of a central European city. **Journal of Climatology**, v. 24, n. 11, p.1395–1421, 2004.

CORREIA, F. W. S. **Estudo do Balanço de Radiação em Área de Policultivo na Amazônia**. 137 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2000.

COX, E. P. **Interação entre clima e superfície Urbanizada: o caso da cidade de Várzea Grande/MT**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Física, Universidade Federal do Mato Grosso- Cuiabá, 2008.

CUI, Y. P.; LIU, J. Y.; KUANG, W. H.; WANG, J. B. The local climate and energy budget differences between a typical architectural complex and a green park in Beijing. **Procedia Environmental Sviences**, v. 13, p.1907-1921, 2012.

DANNI-OLIVEIRA, I. M. Aspectos conceituais do sistema clima urbano: uma breve revisão bibliográfica sobre as ilhas de calor. **Caderno de Geociências**. Rio de Janeiro, n.15, 1995.

FERREIRA M. J.; OLIVEIRA A.P.; SOARES J.; CODATO G.; BÁRBARO E. W.; ESCOBEDO J. F. Radiation balance at the surface in the City of São Paulo, Brazil: diurnal and seasonal variations. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 107, p. 229-246, 2012.

FERREIRA, M. J. **Estudo do balanço de energia na superfície da cidade de São Paulo**. 183f. Tese de Doutorado. Departamento de Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010

FERREIRA, M.J.; OLIVEIRA, A.P.; SOARES, J.; BÁRBARO E.W.; CODATO, G.; MARCIOTTO, E.R.; SILVA, M. Evolução diurna do balanço de radiação na superfície da cidade de São Paulo, Brasil. In: VII Congreso Iberoamericano de Ingenieria Mecânica. **Anais ...** Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 3, p. 411-418, 1991

FREITAS, E. D. **Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes**. 165 f. Tese de Doutorado. Departamento de Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

GIONGO, P. R. **Estimativa do balanço de radiação com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície**. 255f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.

GOMES, F. J. D. **Relação entre Variáveis Meteorológicas e Cobertura do Céu na região central de Cuiabá e entorno**. Cuiabá. 73f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá. 2010.

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, p.792-810, 2002.

GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Heat Storage in Urban Areas: Local-Scale Observations and Evaluation of a Simple Model. **Journal of Applied Meteorology**, v.38, p.922 – 940, 1999.

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.; SOUCH, C.; HUBBLE, M. The influence of tree cover on summertime energy balance fluxes, San Gabriel Valley, Los Angeles. **Climate Research**, v. 6, p.45–57, 1996.

HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; STRECK, N. A. Estimativa do saldo de radiação em girassol como função da radiação solar global. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 194–199, 2012.

JARDIM, C. H. **Proposta de síntese climática a partir do comportamento térmico e higrométrico do ar em duas áreas urbanas**. 334f. Tese. Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

KAWAI, T. KANDA, M. Urban Energy Balance Obtained from the Comprehensive Outdoor Scale Model Experiment. Part II: Comparisons with Field Data Using an Improved Energy Partition. **Journal Applied Meteorology Climatology**, v.49, p.1360–1376, 2010.

KRAYENHOFF, E. S. & VOOGT, J. A. A microscale three-dimensional urban energy balance model for studying surface temperatures. **Boundary-Layer Meteorology**, n. 123, p.433–461, 2007.

LANDSBERG, M. E. **The urban climate**. New York: Academia Press, 1981. 276p.

LEÃO, M. S. **Diagnóstico climático e estudos das variações termo-higrométricas do município de Sete Lagoas - MG**. 150 f. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

LEITÃO, M. de M. V. B. R.; SANTOS, J. M. dos; OLIVEIRA, G. M. de. Estimativas do albedo em três ecossistemas da floresta amazônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p.256-261, 2002.

LEITÃO, M. M. V. B. R.. **Balanço de radiação em três ecossistemas da Floresta Amazônica: Campina, Campinarana e Mata Densa**. 135f. Tese Doutorado. INPE. São José dos Campos. 1994.

LIBERATO, A. M.; CARDOSO, F. L. Análises da radiação de onda curta e onda longa na Amazônia. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 27, n. 3, 2010.

MAITELLI, G. T. Balanço de energia estimado para a cidade de Cuiabá: uma abordagem de balanço de energia pelo método de Bowen. **Revista FÓRUM - Clima Urbano e Planejamento das Cidades**; v. 3, n. 2, 2009.

MACHADO, A. J. Análise do balanço radiativo na Avenida Queiroz Filho – São Paulo/SP sob condição de céu claro na estação seca. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 15, n.1, jan./abr. 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**. 145f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2008.

MARCIOTTO, E. R.; OLIVEIRA, A. P.; HANNA, S. R. Modeling study of the aspect ratio influence on urban canopy energy fluxes with a modified wall-canyon energy budget scheme. **Building and Environment**, v. 45, p. 2497-2505, 2010.

MICHILES, A. A. dos S. **Taxas de armazenamento térmico na biomassa e balanço de energia em superfície para áreas de floresta e de terra firme na Amazônia.** 184f. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, 2009.

MOURA, R. G. de. **Estudos das radiações solar e terrestre acima e dentro de uma floresta tropical úmida.** 146f. Dissertação Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2001.

NUNEZ, M.; OKE, T. R. The Energy Balance of an Urban Canyon. **Journal of Applied Meteorology**, v.16, p.11-19, 1977.

OFFERLE, B.; GRIMMOND, C. S. B.; FORTUNIAK, K.; PAWLAK, W. Intraurban Differences of Surface Energy Fluxes in a Central European City. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 45, jun, 2006.

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.

OKE, T.R. **Review of Urban Climatology**, 1968-1973. WMO Technical Note No. 134, WMO No. 383. World Meteorological Organization: Geneva. 1974

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, p. 1-24, 1982.

OKE, T. R.; SPRONKEN-SMITH, R.; JAUREGUI, E. ; GRIMMOND, C.S.B. The energy balance of central Mexico City during the dry season. **Atmospheric Environment**, v.33, p.3919-3930, 1999.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates.** New York: Routledge, 2005. 435p.

OKE, T. R. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites.** Instruments and Methods of Observation Programme IOM Rep. 81, WMO/TD N°. 1250, 51. 2004

OKE, T. R. Towards better communication in urban climate. **Theoretical and Applied Climatology**, v.84, p.179-189, 2006.

RECIFE. Prefeitura. **Desenvolvimento Humano no Recife: atlas municipal**, 2005.

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, p.1766-1781, 2006.

SANTOS, M. A.; CAMARGO, M.B.P. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n.1, p.173-183, 2006.

SANTOS, T. O.; SILVA, A. O. ; MOURA, G. B. A. ; LOPES, P. M. O.; SILVA, A. P. N. ; LUCENA, A. C . Variação da temperatura e umidade do ar entre as áreas urbanas de Recife. In: IX JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO - UFRPE. **Resumos...** 2009, Recife.

SILVA, L. D. B. et al. Relações do saldo de radiação em grama batatais e capim tanzânia com a radiação solar global em Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, n. 3, p. 250-256, 2007.

SILVA, T. G. F. da; MOURA, M. S. B. de; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; SOUZA, L.A S. B. de; BRANDÃO, E. O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**,v.15, n.2, p.139–147, 2011.

SOUZA FILHO, J. D. da C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M. H.; COHEN, J. C. P.; ROCHA, E. J. P. da . Variação sazonal do balanço de radiação em uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3b, p.318-330, 2006.

TEJEDA-MARTÍNEZ, A.; JÁUREGUI-OSTOS, E.: Surface energy balance measurements in the Mexico City region: a review. **Atmosfera**, v.18, n.1-23, 2005.

UGEDA JÚNIOR, J. C.; AMORIM, M. C. de C. T. Clima urbano em Jales/SP: análise do campo térmico e higrométrico para os meses de janeiro e julho de 2010. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 7, v. 8, jan/jun/2011.

VELASCO, E.; PRESSLEY, S.; GRIVICK, R.; ALLWINE, E.; MOLINA, L. T.; LAMB, B. Energy balance in urban Mexico City: observation and parameterization during the MILAGRO/MCMA-2006 field campaign. **Theoretical and Applied Climatology**, July, 2010.

VILANI, M. T.; SANCHES, L.; PINHEIRO, M.R; JUNIOR, O. B. P.; Estimativa da radiação de onda longa incidente em uma floresta semidecídua tropical da Bacia Amazônica. **Ciência e Natura**, UFSM, v.32, n.1, p.65 - 81, 2010.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.

WOOD, C. R.; LACSER, A.; BARLOW J. F.; PADHRA A.; BELCHER S. E.; NEMITZ E.; HELFTER C. ; FAMULARI D.; GRIMMOND C. S. B. Turbulent Flow at 190m Height Above London During 2006–2008: A Climatology and the Applicability of Similarity Theory. **Boundary-Layer Meteorology**, June, 2010.

XAVIER, A. L.; NOGUEIRA, M. C. de J. A.; MAITELLI, G. T.; OLIVEIRA, A. G. de; OLIVEIRA, A. S. de ; SANTOS, F. M. de M.; NOGUEIRA, J. de S. Variação da temperatura e umidade entre áreas urbanas de Cuiabá. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 6, n. 1, p. 082-093, jan/abr, 2009.