

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**SALDO DE RADIAÇÃO DA COPA DE LARANJEIRA NUM POMAR E DE
RENQUES DE CAFEEIROS: MEDIDAS E ESTIMATIVAS**

Felipe Gustavo Pilau

Tese apresentada, para obtenção do título de
Doutor em Agronomia. Área de
concentração: Física do Ambiente Agrícola.

Piracicaba
2005

**Felipe Gustavo Pilau
Engenheiro Agrônomo**

**SALDO DE RADIAÇÃO DA COPA DE LARANJEIRA NUM POMAR E DE RENQUES
DE CAFEEIROS: MEDIDAS E ESTIMATIVAS**

**Orientador:
Prof. Dr. Luiz Roberto Angelocci**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Física do Ambiente
Agrícola.**

**Piracicaba
2005**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Pilau, Felipe Gustavo

Saldo de radiação da copa de laranjeira num pomar e de renques de cafeeiros:
medidas e estimativas / Felipe Gustavo Pilau. - - Piracicaba, 2005.
92 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2005.

1. Café 2. Dossel 3. Laranja 4. Modelagem matemática 5. Radiação (Energia
radiante) I. Título

CDD 634.31

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Aos meus pais, LAERCIO e IVONI,
e meu irmão EDUARDO, com
muito amor, gratidão e respeito

OFEREÇO

À amada MÁRCIA,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e presença constante, guiando-me em meu caminho.

Ao professor Luiz Roberto Angelocci, pela orientação e ensinamentos, amizade, incentivo e contribuição para o meu crescimento profissional.

Ao professor Nilson Augusto Villa Nova, pelos valiosos ensinamentos transmitidos e amizade.

Ao professor Paulo César Sentelhas pela amizade e colaboração.

Ao professor Paulo Augusto Manfron, da Universidade Federal de Santa Maria, grande amigo, pelo incentivo, ensinamentos e convívio.

Ao professor Durval Dourado Neto, pelos ensinamentos, amizade e convívio.

Ao pesquisador Fábio Marin, pela amizade e colaboração.

Ao grande amigo Reinaldo Bonnacarrère, pela amizade, companheirismo e convivência.

Aos amigos José Eduardo (vulgo “Pinhão”), Ricardo Wanke e Thomas Martin, pelo convívio amigo e colaboração.

Aos colegas de curso Santiago, Evandro, Gustavo, Beatriz, Cristiane, Karasawa, Eduardo, Jones e Derblai, pela amizade e momentos de descontração.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, e ao Curso de Pós-graduação em Física do Ambiente Agrícola, por proporcionar crescimento pessoal e profissional a seus alunos.

A CAPES pela concessão da bolsa.

À FAPESP e ao CNPq, pelo suporte financeiro para instalação e condução do experimento.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas pelo auxílio e serviços prestados.

Aos demais amigos e pessoas que de uma forma ou outra estiveram ao meu lado, auxiliando e incentivando para a conclusão desse trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO	9
2 DESENVOLVIMENTO	11
2.1 Revisão bibliográfica	11
2.1.1 A cultura do cafeeiro	11
2.1.2 A cultura da laranjeira	12
2.1.3 Importância da interceptação de radiação solar pelas plantas	14
2.1.4 Medida do saldo de radiação em copas de lenhosas	15
2.1.5 Estimativa do saldo de radiação de copas de lenhosas	18
2.1.5.1 Relação entre o saldo de radiação de plantas e a irradiância solar global e o saldo de radiação de gramado	18
2.1.5.2 Estimativa do saldo de radiação pelo uso da lei de Beer	19
2.1.5.3 Modelagem físico-matemática do saldo de radiação	21
2.2 Material e métodos	24
2.2.1 Descrição da área experimental	24
2.2.2 Medidas biométricas	25
2.2.3 Medidas do saldo de radiação da copa de laranjeira por sistema móvel de integração espaço-temporal	26
2.2.4 Medida do saldo de radiação de um trecho de renque de cafeeiros por sistema móvel de integração espaço-temporal	32
2.2.5 Medidas da irradiância solar global, radiação solar difusa e saldo de radiação de gramado	35
2.2.6 Estimativa do saldo de radiação para árvore de laranjeira e renque de cafezal utilizando a lei de Beer	36
2.2.7 Modelo de estimativa do saldo de radiação para plantas “isoladas” de laranjeira	37
2.2.8 Modelo de estimativa do saldo de radiação para renques de cafeeiros	39
2.2.8.1 Interceptação de radiação solar direta pelo renque	39
2.2.8.2 Interceptação de radiação solar difusa pelo renque	41
2.2.8.2.1 Caso das “paredes” horizontais	41
2.2.8.2.2 Caso das “paredes” verticais	41
2.3 Resultados e discussão	42
2.3.1 Variação temporal do saldo de radiação de uma laranjeira medida pelos saldo-radiômetros nas diferentes latitudes	42
2.3.2 Variação temporal do saldo de radiação de um trecho de renque de cafeeiros nas diferentes posições de montagem	46
2.3.2.1 Cafezal formado	46
2.3.2.2 Cafezal em formação	50
2.3.3 Relações do saldo de radiação da copa da laranjeira com a irradiância solar global e o saldo de radiação de gramado	53
2.3.4 Relação do saldo de radiação de renque do cafezal com irradiância solar global e saldo de radiação de gramado	60
2.3.4.1 Cafezal formado	60
2.3.4.2 Cafezal em formação	63
2.3.5 Estimativa do saldo de radiação da árvore de laranjeira pelo uso da lei de Beer	72

2.3.6 Estimativa do saldo de radiação do renque de cafeeiros pelo uso da lei de Beer.....	75
2.3.7 Estimativa do saldo de radiação da copa de laranjeira pelo modelo proposto	77
2.3.8 Estimativa do saldo de radiação de renque de cafeeiros pelo modelo proposto.....	80
3 CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS	87

RESUMO

Saldo de radiação da copa de laranjeira num pomar e de renques de cafeeiros: medidas e estimativas

A energia radiante absorvida pelas plantas é a principal determinante da taxa fotossintética, condicionando o crescimento e desenvolvimento vegetal, produção e qualidade dos produtos, sendo ainda uma variável fundamental na determinação da transpiração, possibilitando estabelecer relações entre essa variável e a evapotranspiração de referência, podendo-se determinar o coeficiente basal de culturas que orientarão nos processos de irrigação. Em vista da sua importância e do reduzido número de estudos de medida e estimativa do saldo de radiação da folhagem de arbóreas, objetivou-se realizar medidas do saldo de radiação de uma laranjeira (R_{nl}), cv. Pêra do Rio, com um sistema móvel de integração espaço-temporal para árvores “isoladas”, instalando-se oito saldo-radiômetros na armação circular vertical em torno da copa, que através do movimento de três rotações por minuto, criava uma esfera “sensora” de medida ao redor da planta, e de trechos de renques de um cafezal (R_{nc}) formado, variedade Mundo Novo Apuatã, e de cafezal em formação, variedade Obatã IAC 1669-20, utilizando-se um sistema móvel de integração espaço-temporal para cultivos em renques, no qual oito saldo-radiômetros, fixados em uma armação circular vertical em torno da folhagem, movimentavam-se ao longo de 4,7 m de renque, criando um cilindro “nocional” de medida. O estudo no laranjal ocorreu entre outubro/04 e junho/05, e nos cafezais entre março/04 e maio/05, com ocorrência de diferentes áreas foliares. Os dois sistemas apresentaram-se eficientes para a medida do saldo de radiação. Essas medidas foram correlacionadas à irradiância solar global (R_g) e ao saldo de radiação de gramado (R_{ng}), medidos em estações meteorológicas automáticas. Obtiveram-se melhores ajustes das análises de regressão entre os valores de R_{nl} e R_g , nas escalas de 15 min e horária, verificando-se ainda bom ajuste entre essas variáveis na escala diária para as diferentes áreas foliares (AF). Também na escala diária, bom ajuste foi obtido entre R_{nl} por área unitária de projeção da copa no solo ($R_{ng/AP}$) e R_{ng} . Bons ajustes foram também obtidos entre o saldo de radiação dos cafeeiros em formação (R_{nc}) com R_g e R_{ng} , nas escalas de 15 min e horária, e também para cafeeiros formados, inclusive na escala diária. Porém, não se verificou um ajuste único de R_{nc}/AF com R_g ou R_{ng} para as diferentes áreas foliares dos cafeeiros em formação, na escala diária. O uso da lei de Beer para estimativa de R_{nl} e R_{nc} no período de 6-18h levou a valores subestimados em 17% para a laranjeira e em 8% para os cafeeiros em formação, comparados aos valores medidos, devendo-se atentar, portanto, para as limitações do uso da lei. Foram propostos modelos físico-matemáticos para estimativa de R_{nl} e R_{nc} , que apresentaram boa concordância com os valores medidos em ambas as espécies, para diferentes áreas foliares, na escala de 15 min. Ao correlacionar-se os valores de saldo de radiação medidos e estimados pelos modelos na escala diária, para todos os valores de área foliar, obteve-se superestimativas de 6% para a laranjeira e de 5% para o renque de cafeeiros formados, indicando o bom desempenho dos modelos.

Palavras-chave: Saldo de radiação; Laranjeira; Cafeeiros; Irradiância solar global; Saldo de radiação de gramado; Lei de Beer; Modelagem

ABSTRACT

Net radiation of orange tree canopy in an orchard and coffee hedgerows: measurements and estimates

The solar energy absorbed by plants is the main determinant factor of photosynthetic rate, conditioning growth and crop development, production and products qualities, still being a fundamental variable to determine transpiration. In relation to transpiration, it is possible to establish relationships between this variable and reference evapotranspiration, allowing to determine the basal crop coefficient, which will guide irrigation management. Regarding to the importance and the few number of studies about measurements and estimates of net radiation of arboreal canopy, this project aimed to accomplish net radiation measurements in an orange tree canopy within an orchard (R_{nl}), cultivar Pêra do Rio, with a device for measuring all wave net radiation absorbed by “single” trees, deploying eight net radiometers on a circular frame which rotates around the canopy, at 3 rpm, creating a “sensing sphere”, and in hedgerows (R_{nc}): of a mature coffee plantation, variety Mundo Novo Apuatã; and of a young coffee plantation, variety Obatã IAC 1669-20, with a device for measuring total radiation absorbed by hedgerows, deploying eight net radiometers on a vertical circular frame around the plants, moving in a rail of 4.7 m along the hedgerow, creating a “notional cylinder” of measurement. The study in the orange orchard was carried out from October/2004 to June/2005, and in the coffee plantation was from March/2004 to May/2005. Both devices for net radiation measurements worked well. These measurements were correlated to global solar radiation (R_g) and grass net radiation (R_{ng}), routinely measured in automatic weather stations. The best fits between R_{nl} and R_g , using regression analyses, were obtained for data of 15 min and hourly periods. Good agreement between these was also observed when the different leaf areas (AF) were considered, at daily scale. The same was observed for the relationship between R_{nl} by canopy drip line (R_{nl}/AP) and R_{ng} . For the young coffee hedgerow, a good correlation was observed between R_{nc} and R_g or R_{ng} , for both 15 min and hourly scales, and for mature coffee hedgerow, even at daily scale. An unique relationship between R_{nc} and R_g or R_{ng} was not verified for different leaf areas of young coffee hedgerow, at daily scale. The use of Beer’s law to estimate R_{nl} and R_{nc} from 6 a.m. to 6 p.m. resulted in an underestimation of 17% to the orange tree and 8% to the young coffee hedgerow, when compared to measured values, which suggest caution to the limitations of this law. The physical-mathematical models proposed to estimate R_{nl} and R_{nc} presented good levels of agreement between measured and estimated values for both species, at different leaf areas, at 15 min scale. When correlating the measured and estimated values, for all leaf areas, at daily scale, it was obtained an overestimation of 6% for orange tree, and of 5% for young coffee hedgerow, showing a good performance of these models.

Keywords: Net radiation, Orange tree; Coffee hedgerow; Global solar radiation; Grass net radiation; Beer law; Modeling

1 INTRODUÇÃO

A energia radiante absorvida por uma planta é o principal determinante de sua taxa fotossintética e da perda de água através da transpiração e, juntamente a fatores complementares como temperatura do ar e do solo, disponibilidade hídrica e nutrição mineral, condiciona o crescimento e desenvolvimento vegetal, a produtividade, e a qualidade desses produtos.

No caso dos estudos envolvendo a perda de água por uma cultura, o saldo de radiação da cobertura vegetal é uma variável fundamental e sua determinação ou estimativa tem sido o objetivo de inúmeros trabalhos encontrados na literatura, com maior frequência em dosséis vegetativos “contínuos” ou com certa homogeneidade de distribuição dos componentes da cobertura vegetal. Quando se trata de culturas denominadas “descontínuas”, nas quais as plantas de interesse estão “dispersas” no campo, com grande espaçamento entre elas, por exemplo em laranjais, mangueirais, etc, de maneira tal que elas podem ser consideradas como plantas “isoladas”, pois crescem tendo-se acesso a todos os seus lados, as condições microclimáticas apresentam características peculiares, principalmente quanto aos regimes de radiação e de vento aos quais as plantas ficam submetidas. Da mesma forma ocorre em dosséis de culturas com adensamento das plantas na linha de plantio (renques), de tal maneira que a folhagem da espécie de interesse econômico ocupa totalmente a linha de plantio quando na maturidade, restando parte do espaçamento entre as linhas (“entrelinhas”) para o trânsito de pessoas e de maquinaria.

Com o incremento na implantação da irrigação localizada para esses tipos de dosséis, passa a ser fundamental a determinação do saldo de radiação por planta e por trecho de renques, utilizado em modelos de estimativa de transpiração ou da evapotranspiração. Com um cenário evidenciando a escassez da água, faz-se necessário estimar com precisão a quantidade de água a ser fornecida por irrigação, maximizando a eficiência de utilização desse recurso natural.

A determinação do saldo de radiação da copa de plantas arbóreas é complicada pois ele é afetado pela geometria de plantio e da copa, pelo porte da planta e a área foliar, requerendo a utilização de sistemas móveis de medidas e instrumentação adequada, realizável apenas dentro da investigação científica. As medidas realizadas pelos sistemas móveis de integração do saldo de radiação podem ser utilizadas para a aferição de modelos físico-matemáticos, criados para estimar a interceptação da radiação por espécies arbóreas.

Outra forma de estimativa é o uso de modelos matemáticos simplificados, através de análises de regressão entre as medidas do saldo de radiação das plantas de interesse com irradiância solar global ou com o saldo de radiação de gramado.

Outra forma de modelagem baseia-se na lei de Beer, assumindo-se que a radiação é extinta de forma exponencial no interior do dossel da planta, em função de sua área foliar e do coeficiente de extinção.

São utilizados, também, modelos físico-matemáticos mais rebuscados, os quais levam em consideração parâmetros como dimensões do pomar, forma e dimensões do renque e/ou das plantas, orientação, radiação solar e suas componentes direta e difusa, porosidade do dossel e também seu poder de reflexão.

Levando em consideração esses aspectos e a necessidade de estudo mais aprofundado do assunto, principalmente em duas culturas de alto interesse para o país, o trabalho objetivou a realização de medidas do saldo de radiação de renques de cafeeiros e da copa de uma planta “isolada” de laranjeira, através de integração espaço-temporal de medidas do saldo de radiação nessas estruturas vegetais. Tais medidas foram usadas para se estabelecer relações em várias escalas de tempo do saldo de radiação com a irradiância solar global e com o saldo de radiação de gramado. As medidas ainda foram utilizadas para testar a possibilidade de estimativa do saldo de radiação dessas coberturas vegetais pelo uso da lei de Beer, e por modelos físico-matemáticos de estimativa de saldo de radiação de árvore de laranjeira e de trecho de renque de cafeeiros.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 A cultura do cafeeiro

As plantações comerciais de café estão mundialmente distribuídas desde o Havá (20° a 25° N), passando por Cuba (22° N), até o estado do Paraná (22° a 23°S) nas Américas, estendendo-se também desde o oeste até o Lago Victória, na África (CARR, 2001). São duas as espécies utilizadas na cafeicultura. A principal, *Coffea arabica* L., responde por 70% do volume comercializado, tendo o Brasil como maior produtor mundial, registrando 31,1 milhões de sacas beneficiadas na safra 2004/2005 (Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2005), e *Coffea canephora* (30% da produção mundial), produzido principalmente em países como Indonésia, Camarões e Uganda (KRUG, 1965; CARR, 2001).

O café chegou ao Brasil em Belém do Pará, expandindo-se logo em seguida para regiões do Maranhão, Ceará, Vale do São Francisco, Goiás, Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro (TASSARO, 1996). Hoje os maiores produtores de café são os estados de Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Paraná, Bahia e Rondônia (Associação Brasileira da Indústria de Café - ABIC, 2005).

Um fator ambiental limitante ao crescimento do cafeeiro é a temperatura do ar. Temperaturas inferiores a 5°C provocam sérios danos às plantas, registrando-se a morte dessas na ocorrência de temperaturas negativas. Semelhantemente, temperaturas médias acima de 30°C podem ser letais. As zonas ótimas para a cultura do café arábica caracterizam-se por temperaturas médias anuais entre 18° e 22° C. O regime pluviométrico é o outro grande fator ambiental limitante, sendo adequado de 1600 a 1800 mm por ano. Na ocorrência de um regime pluviométrico inferior a 1000 mm, recomenda-se uma suplementação via irrigação (CARDOSO, 1994).

Por ser uma planta originalmente de ambiente sombreado, dos sub-bosques de florestas da Etiópia, a saturação luminosa da cultura é baixa, considerando-se os elevados valores de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), ao redor de $2.500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, encontrados nos trópicos. Folhas

expostas diretamente à radiação solar saturam-se à aproximadamente $600 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, e folhas sombreadas a $300 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (KUMAR; TIESZEN, 1980; FAHL; CARELLI, 1994).

A cultura apresenta como característica ecofisiológica importante o fato de necessitar dois anos para completar seu ciclo reprodutivo, ou seja, é uma cultura de ciclo bienal, alternando ano de altas e de baixas produtividades (CAMARGO; CAMARGO, 2001).

O cafeeiro, originalmente cultivado em espaçamentos amplos entre plantas, cobrindo menos de 50% da superfície do solo, com até $3.000 \text{ plantas.ha}^{-1}$, a partir da década de 80 passou a ser também cultivado em sistema adensado, com 3.000 à $7.000 \text{ plantas.ha}^{-1}$, ou até mesmo em super-adensamento, com densidade de plantio superando $7.000 \text{ plantas.ha}^{-1}$. Nesses sistemas adensados, normalmente as plantas são agrupadas formando contínuos vegetados denominados de renques. Devido aos espaçamentos reduzidos, necessita-se escolher criteriosamente as variedades aptas a essas áreas, dando preferência às de porte menor, como as variedades IAC-Catuai Vermelho e IAC-Catuai Amarelo, consideradas apropriadas para esses cultivos. Já as cultivares de porte alto como Mundo Novo, Icatu Vermelho e Icatu Amarelo, Acaiá e Bourbon Amarelo, são menos indicadas, pois pelo próprio porte, fecham mais rapidamente, exigindo podas mais cedo (THOMAZIELLO, 2001).

2.1.2 A cultura da laranjeira

As plantas de laranjeiras (*Citrus sinensis* (L.) Osb.), originárias das regiões subtropicais e tropicais do sul e sudeste da Ásia, incluindo áreas da Austrália e África, foram levados para a Europa na época das Cruzadas e trazidas ao Brasil pelos portugueses no século XVI (MATTOS JUNIOR et al., 2005).

Apesar de serem consideradas plantas de clima tropical, apresentam boa adaptação à regiões de clima temperado com inverno pouco rigoroso, sendo encontradas do sul ao norte do Brasil. O fator limitante de maior importância ao cultivo da laranjeira é a temperatura do ar. Temperatura entre 23° e 32°C e umidade do ar elevada são preferíveis, ocorrendo a paralisação do crescimento com temperaturas inferiores a 13°C ou superiores a 40°C , e não tolerando valores inferiores a -5°C , podendo ocorrer nesse caso a morte das plantas (KOLLER, 1994).

Em geral costuma-se afirmar que uma precipitação anual de 1.000 a 2.000 mm é satisfatória para atender todas as necessidades dos citros, afirmativa essa que pode induzir a erros, pois a evapotranspiração muda acentuadamente de uma região para outra, durante os 12 meses do ano, necessitando-se sim boa disponibilidade hídrica para a cultura nas épocas de maior evapotranspiração. A cultura da laranjeira requer ainda uma alta incidência de radiação solar, pois a produtividade e a qualidade dos frutos está diretamente associada a essa variável meteorológica (KOLLER, 1994).

O espaçamento utilizado em pomares de laranjeiras normalmente é amplo, permitindo a circulação de pessoas, máquinas e equipamentos para realização dos tratos culturais e colheita, devendo possibilitar um ótimo aproveitamento da radiação solar, água e nutrientes em benefício da máxima produção. Em geral, o plantio é realizado em linhas, com espaçamento de 6 a 8 m entre linhas por 3 à 5 m entre plantas na linha (KOLLER, 1994).

A produção de frutas cítricas ocupa grande parte das faixas tropical e subtropical do globo, tornando a laranjeira uma das frutíferas mais cultivadas em todo o mundo. No Brasil, a produção de laranjas desenvolveu-se muito a partir dos anos 60, em decorrência de uma geada que destruiu grande parte dos laranjais da Flórida, Estados Unidos, até então maior produtor mundial de sucos cítricos, passando a demandar importações, impulsionando assim países, como o Brasil, a investir na cultura. Nos últimos 20 anos, com a instalação dos laranjais, foram bastante notáveis as mudanças ocorridas na paisagem das regiões produtoras, principalmente do estado de São Paulo, que se transformou no principal produtor do país (TASSARO, 1996).

Hoje, o Brasil figura no cenário mundial como maior produtor da fruta, tendo além de São Paulo, onde se concentra cerca de 85% da produção nacional, outros estados brasileiros com considerável produção de laranja, destacando-se Rio de Janeiro, Minas Gerais, Sergipe, Rio Grande do Sul, Paraná e Goiás, registrando produção superior a 18 milhões de toneladas em 2004, seguido pelos Estados Unidos. Juntos, Brasil e Estados Unidos são responsáveis por 45% da produção mundial (TASSARO, 1996; MATTOS JUNIOR, 2005; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2005).

2.1.3 Importância da interceptação de radiação solar pelas plantas

A radiação solar interceptada e absorvida pelos vegetais é fonte exclusiva de energia para os processos físicos, fisiológicos e bioquímicos, sendo de grande importância para determinação do acúmulo de massa seca e perda de água pela vegetação, assim como na determinação de muitas características de seus microclimas (STANHILL; HOFSTEDE; KALMA, 1965; CAMPBELL; NORMAN, 1998; MELO-ABREU; SNYDER; RIBEIRO, 2002). Monteith, 1977 apud Campbell e Norman (1998), observou uma relação linear entre a biomassa acumulada por uma comunidade vegetal e a radiação solar interceptada.

A partir dessa e de outras observações, têm-se desenvolvido modelos físico-matemáticos para simulações de processos como taxa fotossintética ou simplesmente acúmulo de fitomassa e transpiração de plantas, utilizando a radiação solar interceptada e absorvida como parâmetro fundamental. Muitos estudos têm sido realizados, principalmente para culturas anuais como milho, trigo, arroz, cevada, girassol, feijão e soja, utilizando modelos de estimativa de produtividade da cultura, como a série de modelos do tipo CERES (JONES; KINIRY, 1986), criados e testados em várias regiões produtoras do mundo.

Assim como a relação encontrada entre o acúmulo de biomassa por uma comunidade vegetal e a interceptação de radiação solar, a transpiração é também grandemente influenciada por esta variável. Nutman (1941), já demonstrara a relação existente entre a taxa de transpiração de cafeeiros e a radiação solar global, fato destacado também por Gutiérrez e Meinzer (1994) e Marin et al. (2003).

Estudos como o de Marin (2003) tem demonstrado, também, boa relação entre transpiração, tanto medida por fluxo de seiva quanto estimada pelo modelo de Penman-Monteith e o saldo de radiação. Relações similares também foram verificadas para macieira, noqueira, entre outras culturas perenes de espécies lenhosas (BUTLER, 1976; THORPE, 1978; GREEN, 1993; VALANCOGNE et al., 2000). O desenvolvimento do modelo de estimativa da evapotranspiração de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965) foi um fato importante nesses estudos, não somente porque tornou-se um método padrão para estimativa da evapotranspiração de referência, mas também porque ele foi adaptado e utilizado para estimativa da transpiração de plantas isoladas a partir de Butler (1976).

Desta forma, com o saldo de radiação da folhagem da planta de interesse, e as demais variáveis exigidas pelos modelos de estimativa da transpiração, tem-se a possibilidade de estabelecer relações entre a transpiração da planta e a evapotranspiração de referência, determinando o coeficiente basal de culturas que orientarão no processo de irrigação localizada, pois com a escassez da água aumentando a cada dia, faz-se necessário otimizar a sua utilização, principalmente na agricultura, manejando de forma mais racional os sistemas de irrigação.

2.1.4 Medida do saldo de radiação em copas de lenhosas

Devido a crucial importância da energia radiante nos processos de estimativas de produção, transpiração e evapotranspiração das culturas, vários estudos teóricos e experimentais tem sido realizados sobre a interceptação da radiação solar por dosséis de plantas, principalmente quando se trata de dosséis horizontalmente homogêneos, como pastagens (BROUGHAM, 1958), trigo de inverno, gramado (MONTEITH; SZEICZ, 1961; IDSO; BAKER; BLAD, 1969), batata (NKEMDIRIM, 1973), girassol (LEMEUR, 1973), sorgo sacarino (ASSIS et al., 1987), soja (FONTANA; BERLATO; BERGAMASCHI, 1991), fava (RIDAO et al., 1996), entre outras culturas, principalmente pela maior facilidade experimental da sua determinação.

Poucos trabalhos, porém, exploram o balanço de radiação de plantas arbóreas formando dosséis descontínuos, com setorização da vegetação (árvores “isoladas”, renques de plantas). Stanhill; Hofstede e Kalma (1965) realizaram um dos primeiros estudos do balanço de radiação de vegetação natural e agrícola, utilizando um dossel descontínuo caracterizado por um pomar de laranjeira, porém com metodologia similar à utilizada para cultivos homogêneos, posicionando um saldo-radiômetro com suas placas na horizontal acima do pomar.

Mais recentemente, grupos de pesquisadores tem se dedicado ao estudo do saldo de energia radiante de dosséis descontínuos, focando na radiação interceptada pela planta de forma individualizada, e não mais pelo dossel como um todo.

São duas as principais geometrias de plantio desses dosséis que estão sendo exploradas. Uma caracteriza-se pela presença de plantas "isoladas", crescendo individualmente, tendo-se acesso a todos os seus lados, característica dos pomares de citros. A outra geometria de interesse é a formada por renques, onde o dossel é formado por fileiras de plantas, podendo o espaçamento

entre plantas na linha de cultivo ser tomado totalmente pela área foliar quando elas atingem a maturidade, restando apenas o espaçamento entre fileiras para o trânsito de pessoas e maquinaria.

Landsberg et al. (1975) realizaram medidas radiométricas, incluindo o saldo de radiação da folhagem do renque em macieral na Grã-Bretanha. Para isso, instalaram oito saldo-radiômetros lineares, fixados ao longo da linha de plantio, orientando-os de forma a darem as componentes do saldo de radiação perpendicularmente a um cilindro imaginário englobando a copa da macieira. Com isso, verificaram o padrão de variação do saldo de radiação por unidade de área foliar ao longo do dia.

Posteriormente, Thorpe (1978) utilizou essa mesma metodologia de medida de saldo de radiação da copa por unidade de área foliar (Rnf) em macieiras, na Grã-Bretanha, em estudo que envolveu o uso de Rnf na estimativa da transpiração das macieiras.

Em tentativa de melhorar esse tipo de medidas, a partir da década de 90 foi introduzida metodologia que usa sensores movendo-se em torno da folhagem, para se ter uma melhor amostragem, com integração espaço-temporal dos valores. Tal metodologia foi introduzida por McNaughton et al. (1992) para determinação do saldo de radiação e radiação fotossinteticamente ativa de árvores isoladas; aqueles autores denominaram seu sistema móvel de medidas de “Whirligig” (“pião”). Para isso, posicionaram-se oito saldo-radiômetros em uma armação circular vertical de ferro de 1,85 m de raio, em intervalos equidistantes de $22,5^\circ$, visualizando para o interior e exterior da esfera descrita durante um giro do sistema em torno da copa. Cada sensor percorria um caminho circular horizontal cujo raio era dependente da sua posição de montagem. Essa estrutura circular vertical era apoiada sobre uma armação circular horizontal de 1,5 m de diâmetro, permitindo movimento de três rotações por minuto da armação circular vertical em torno da planta. Os 16 sensores quânticos para medida do saldo de radiação fotossinteticamente ativa foram posicionados nas mesmas latitudes de montagem dos saldo-radiômetros, oito visando o centro da esfera sensora e os demais seu exterior.

Para realização das primeiras medidas, em Palmerston, Nova Zelândia, McNaughton et al. (1992) utilizaram uma planta de *Robinia pseudoacacia*, com 3,8 m de altura e $10,6 \text{ m}^2$ de área foliar. O equipamento mostrou-se eficaz na determinação da radiação absorvida por uma árvore isolada, apresentando respostas de cada saldo-radiômetro e valores da integração coerentes.

Posteriormente, o equipamento desenvolvido por McNaughton et al. (1992) foi utilizado por Green (1993), em uma árvore “isolada” de noqueira com $26,4 \text{ m}^2$ de área foliar. Os dados de

saldo de radiação foram incorporados eficientemente no modelo de Penman-Monteith, procedendo-se satisfatoriamente estimativas de transpiração em comparação as taxas volumétricas medidas pelo método de fluxo de seiva. O saldo de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foi combinado à curva de resposta à radiação RFA, produzindo coerentes estimativas de fotossíntese líquida.

Green et al. (1995) utilizaram esse sistema móvel para verificação do aumento na absorção da RFA e saldo de radiação de uma macieira com 35,5 m² de área foliar, durante o verão, pela aplicação de diferentes materiais refletivos ao solo, verificando influência direta nas taxas de transpiração e fotossíntese da planta.

Também utilizando uma planta de macieira (*Malus domestica* Borkh. cv. ‘Splendour’ sobre porta-enxerto MM.106), Green et al. (2001) realizaram medidas do saldo de radiação e radiação fotossinteticamente ativa (RFA) da copa com o “Whirligig”, utilizando os resultados para estimar a distribuição de RFA por medida de área foliar. Combinando os resultados à condutância estomática e às funções de resposta de fotossíntese líquida, estimaram a transpiração e a fotossíntese. Valores de transpiração calculados apresentaram boa relação com medidas de fluxo de seiva, e as estimativas da troca líquida de CO₂ foram compatíveis aos valores registrados para árvores de macieira em câmaras.

Com o mesmo intuito de McNaughton et al. (1992), Angelocci et al. (2004), desenvolveram dois sistemas de integração do saldo de radiação, similares ao proposto pelos autores neozelandeses. O primeiro equipamento tinha como principal modificação o formato da estrutura da armação circular vertical e o sistema de transmissão de torque, além da redução para seis no número de saldo-radiômetros utilizados. Este equipamento mostrou-se funcional, realizando-se vários dias de integração do saldo de radiação para uma árvore de lima ácida “Tahiti”. Os próprios autores, porém, fazem ressalvas à redução do número original de saldo-radiômetros utilizados. A segunda estrutura montada, mais similar à utilizada por McNaughton et al. (1992), utilizou oito saldo-radiômetros posicionados nas mesmas latitudes relatadas por esses autores. Utilizou-se novamente uma árvore de lima ácida “Tahiti”, de maior porte aéreo que a anterior. O equipamento apresentou problemas na transmissão de torque e poucos dias de medida foram realizados, mas ficou clara a potencialidade dessa técnica na determinação do saldo de radiação de copas de árvores.

A técnica de varredura da copa por sistemas móveis foi estendida para renques de cafezais (ANGELOCCI et al., 2003; MARIN, 2003), tomando por base a geometria cilíndrica de amostragem usada por Landesberg et al. (1975) e Thorpe (1978). Para tal, ao contrário da disposição fixa dos sensores utilizados pelos autores britânicos, oito saldo-radiômetros posicionados em torno da copa deslocam-se com velocidade de $12,8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ao longo de um trecho do renque (no caso, 4,28 m), fazendo uma varredura que gera um cilindro nocional de medida, através de ida e vinda tomando 40 s, ao longo do caminho de deslocamento.

2.1.5 Estimativa do saldo de radiação de copas de lenhosas

Três tipos de abordagem tem sido utilizadas para a estimativa do saldo de radiação de copas de espécies lenhosas, seja de plantas “isoladas”, seja de trechos de renque: a) através da relação entre o saldo de radiação da copa com a irradiância solar global e com o saldo de radiação de gramado; b) pelo uso da lei de Beer de atenuação da radiação; c) por modelagem físico-matemática.

2.1.5.1 Relação entre o saldo de radiação de plantas e a irradiância solar global e o saldo de radiação de gramado

Ainda com dados gerados pelos sistemas móveis de integração do saldo de radiação, Angelocci et al. (1999), utilizando uma árvore de lima ácida “Tahiti”, com $41,6 \text{ m}^2$ de área foliar, relatam que o saldo de radiação da árvore equivaleu em média ao saldo de radiação de $14,1 \text{ m}^2$ de gramado. Entretanto, foram encontrados valores distintos dessa relação no período de dezembro a março e de maio a julho, equivalente ao saldo de radiação de $13,5 \text{ m}^2$ e $17,1 \text{ m}^2$ de gramado, respectivamente.

Utilizando-se dos sistemas móveis de integração do saldo de radiação, Angelocci et al. (2001) e Angelocci et al. (2004), relacionaram os dados do saldo de radiação por área de projeção da copa (R_n/PA) de duas árvores de lima ácida “Tahiti” com $39,9 \text{ m}^2$ e $51,2 \text{ m}^2$ de área foliar, aos dados de irradiância solar global (R_s). Encontraram-se as relações lineares de $R_n/AP = 0,94.R_s$ (período diurno), e $R_n/AP = 0,90.R_s$ (24 horas) para a árvore com área foliar de $39,9 \text{ m}^2$, e

$R_n/AP = 0,92.R_s$ (período diurno) e $R_n/AP = 0,79.R_s$ (24 horas) para com $51,2 \text{ m}^2$ de área foliar. Para as escalas de tempo de 15 e 30 minutos e da horária, bons ajustes entre R_n/AP e R_s foram obtidos com curvas sigmóides.

Com os dados de saldo de radiação de uma noqueira com $26,4 \text{ m}^2$ de área foliar, em Palmerston North, Nova Zelândia, obtidos por Green, (1993) e de uma lima ácida “Tahiti”, com $39,9 \text{ m}^2$ de área foliar, em Piracicaba (SP), Brasil, Pereira et al. (2001) estabeleceram relações entre o saldo de radiação dessas árvores (R_{nf}) e o saldo de radiação de gramado (R_{ng}). Os saldos de radiação integrados para as árvores corresponderam ao saldo de radiação de $12,58 \text{ m}^2$ (noqueira) e $8,39 \text{ m}^2$ (lima ácida) de gramado. Expressando, porém, o saldo de radiação de ambas as árvores por unidade de área foliar, obteve-se a relação única, $R_{nf} = 0,32R_{ng}$. Entretanto, não foi possível incluir nessa relação os dados de McNaughton et al. (1992), para *Robinia pseudoacacia*, indicando a dificuldade em encontrar-se uma função única de transferência entre R_{ng} e R_{nf} .

Em seu estudo, Marin (2003) determinou o saldo de radiação para um trecho de renque de cafezal adulto, espaçado de $2,5\text{m} \times 1,0\text{m}$, verificando que esse saldo correspondeu a 49% da irradiância solar global. O autor destaca, porém, que essa relação não pode ser extrapolada para qualquer cafezal, mas apenas para aqueles cultivados em espaçamentos semelhantes ao do estudo, de mesmo porte, para a mesma época do ano e mesma condição de cobertura do solo. Relacionando o saldo de radiação do cafezal ao saldo de radiação de gramado encontrou relação próxima a 1:1.

Os estudos realizados até o momento demonstram que o problema em encontrar uma função de transferência para estimar o saldo de radiação da árvore através de medidas rotineiras de estações meteorológicas, como irradiância solar global e saldo de radiação de gramado, ainda não está resolvido, exigindo estudos mais aprofundados, que levem em conta, por exemplo, a densidade de folhagem, a geometria da copa, a direção das linhas de plantio e o espaçamento.

2.1.5.2 Estimativa do saldo de radiação pelo uso da lei de Beer

Modelos de estimativa do saldo de radiação para arbóreas, tanto plantadas em renques como “isoladamente”, usam a lei de Beer, assumindo que a radiação é extinta exponencialmente no interior do dossel da planta, em função da área foliar e do coeficiente de extinção.

Para plantas “isoladas”, Charles-Edwards e Thornley (1973) descrevem um modelo simples de interceptação da radiação assumindo que as folhas estão uniformemente distribuídas em um volume elíptico, e que a radiação que atravessa esse meio é atenuado de acordo com a lei de Beer.

Norman e Welles (1983), também descrevem a transmissão da radiação para dosséis com cobertura parcial do solo como pomares, assumindo renques em formato elipsóide pela infinidade de formas geométricas a que eles se aproximam, podendo ser igualmente espaçados ou não, com a folhagem randomicamente distribuída e contida em um certo volume. O modelo separa as atenuações de radiação direta e difusa, considerando o multi-espalhamento para a radiação de comprimentos de onda do visível e infra-vermelho, e a emissão para radiação de ondas longas.

Estudando a cultura da macieira, Jackson e Palmer (1979) descrevem um modelo simples de transmissão e interceptação de radiação solar por dosséis descontínuos. O modelo considera o espaçamento entre plantas, distribuição, forma, podas, considerando separadamente a radiação que passa entre as árvores, e a que passa pela folhagem. Assume-se que a radiação transmitida através do dossel das árvores é extinta exponencialmente, expressando-se a área foliar por unidade de projeção da copa sobre o solo. O modelo proposto foi avaliado perante medidas de interceptação em dosséis de macieiras com vários espaçamentos, utilizando coeficiente de extinção igual a 0,6. Os resultados demonstraram a aplicabilidade do modelo, necessitando-se apenas da medida da radiação transmitida através das plantas e abaixo do dossel, de fácil determinação, da área foliar e do coeficiente de extinção.

Baseado no trabalho de Ritchie (1972), Marin (2000) utilizou um método relativamente simples de estimativa do saldo de radiação por unidade de área foliar em uma árvore de lima ácida “Tahiti”, considerando a extinção da radiação pela copa através da lei de Beer.

A energia radiante absorvida por um trecho de renque de cafezal foi determinada por Marin (2003), utilizando-se da lei de Beer. O coeficiente de extinção do saldo de radiação na copa dos cafeeiros (coeficiente de extinção de radiação de ondas longas e curtas) foi obtido a partir de medidas feitas com saldo-radiômetros instalados acima e abaixo do renque de cafeeiro amostrado, com valores de 0,95 a 0,20, assumindo-se o valor médio diário fixo de 0,49. A relação entre os valores medidos e estimados foi boa, superestimando 9% em média a energia radiante absorvida medida. A estimativa torna-se viável a partir da determinação do coeficiente de

extinção e do índice de área foliar, representando um procedimento bem mais simples, com uso de número menor de sensores do que a medida direta em torno da copa.

Um modelo bidimensional de interceptação da radiação solar para renques de árvores frutíferas foi desenvolvido por Annandale et al. (2004), considerando as características do dossel e a orientação das linhas de plantio, assumindo que as folhas são uniformemente distribuídas dentro de um volume elipsóide, e que a radiação que penetra no dossel é atenuada de acordo com a lei de Beer. As radiações direta e difusa correspondentes à RFA (radiação fotossinteticamente ativa) e ao IVP (infra vermelho próximo) são calculadas separadamente, pois interagem diferentemente com o dossel. O modelo foi validado em várias condições (culturas, renques, orientações, densidade de dossel, tamanho e formato das árvores) e os resultados demonstraram que para um dossel elíptico, com distribuição uniforme de folhas, o modelo segue bem o ciclo diurno de transmitância de radiação. Porém, quando o dossel não é simétrico ou não tem distribuição uniforme de folhas, há erros na estimativa da transmitância, diferindo em até 40% dos valores medidos ao longo do dia.

Embora Marin (2000) faça ressalvas quanto à limitação na aplicação dessa lei, que originalmente contempla um meio homogêneo e isotrópico atravessado por radiação monocromática, Campbell e Norman (1998) destacam que no caso em que as variações do coeficiente de extinção não sejam significativas para amplos aspectos de radiação, pode-se lançar mão dessa lei para estudos em vegetação.

2.1.5.3 Modelagem físico-matemática do saldo de radiação.

Na tentativa de estimar a interceptação de radiação por renques de macieira, Palmer (1977) descreve um modelo matemático computacional, basicamente uma modificação do modelo descrito por Jackson e Palmer (1972), assumindo um renque de comprimento infinito e com silhueta triangular. Como premissas, o modelo assume que as estruturas de interceptação da radiação (folhas, galhos e frutos) estão distribuídas uniformemente no volume do renque e que a atenuação da radiação é uma função logarítmica dessas estruturas, não havendo interação entre as estruturas consideradas. Os valores gerados pelo modelo, baseado nos dados de três

espaçamentos de renques, concordaram com os dados de interceptação da radiação direta e difusa medidos.

Examinando a aplicabilidade do modelo empírico proposto para interceptação de radiação por plantas isoladas desenvolvido por Charles-Edwards e Thornley (1973), Charles-Edwards e Thorpe (1976) utilizaram-no para simular os perfis de transmissão de radiação para renques de macieiras. Os perfis simulados demonstraram variações diárias similares às medidas experimentais de perfis de transmissão de radiação para pomar de macieiras, e variações sazonais da interceptação de radiação em renques similares às obtidas por Jackson e Palmer (1972) e por Allen (1974) para renques com silhueta retangular. Para o dia de solstício de verão no hemisfério norte, a orientação dos renques não influenciou a interceptação da radiação difusa, porém renques com orientação leste-oeste absorveram aproximadamente 13% menos de radiação direta que renques orientados norte-sul.

Utilizando-se do modelo matemático-computacional desenvolvido por Palmer (1977), Palmer (1989) estimou a interceptação de radiação e sua distribuição em um renque de macieira, em diferentes épocas do ano, espaçamentos entre renques, latitudes e alturas de plantas. Verificou-se que o efeito da orientação dos renques é complexo e dependente de outros fatores, com diferentes níveis de interceptação para renques em orientação norte-sul ou leste-oeste em função da latitude, época do ano e espaçamento. Os resultados são diretamente relevantes para a arquitetura do pomar, tendo-se como prioridade a maximização da interceptação de radiação, projetando-se alta qualidade de frutos e florescimento contínuo.

Focando ainda o estudo da interceptação da radiação em renques, porém utilizando um vinhedo conduzido em espaldeira, Riou et al. (1989) desenvolveram um modelo que assume uma geometria de dossel simples, paralelepípeda, levando em consideração sua porosidade, relações entre orientação do renque e movimento solar, separando a interceptação das radiações direta e difusa pelas “paredes” do paralelepípedo, permitindo a estimativa da absorção de radiação solar pelo dossel. Valores estimados de absorção de radiação pelo modelo apresentaram boa concordância aos dados experimentais.

O desenvolvimento de um modelo simples, flexível e genérico para estudar a absorção de radiação em dosséis descontínuos, conduziu Röhrig; Stützel e Alt (1999) a uma aproximação tridimensional para analisar a penetração da radiação em dosséis heterogêneos, fornecendo detalhes na absorção de radiação desses dosséis, com rotinas simples e facilmente adaptáveis. No

modelo o volume completo do dossel é subdividido em unidades cúbicas que podem ser vazias ou preenchidas com área foliar, podendo ser usado para qualquer geometria sólida. Frequentemente, plantas individuais podem ser descritas por geometria elipsóide, meia-elipse, cônica ou retangular. A área foliar pode ser distribuída arbitrariamente em uma geometria sólida escolhida e posicionada em qualquer lugar de domínio do modelo. A transmissão através dos cubos é calculada seguindo a trajetória dos raios solares do topo do dossel até o nível do solo. A absorção diária é calculada separadamente para radiação direta e difusa, considerando a reflexão e espalhamento da radiação direta. O modelo foi testado com dados de campo, analisando o efeito de diferentes arquiteturas de dosséis na característica de absorção de radiação, e os resultados demonstraram boa concordância entre valores estimados e medidos de transmissividade do dossel.

Para simular a transmissão, absorção e reflexão da radiação solar global e radiação fotossinteticamente ativa em renques de macieiras, Melo-Abreu; Snyder e Ribeiro (2002) desenvolveram um modelo que separa as fontes de radiação direta e difusa, integrando instantaneamente suas contribuições em qualquer ponto em uma reta que atravessa os renques até atingir a superfície. O modelo foi validado para um pomar de macieira na região nordeste de Portugal, alcançando performance satisfatória, podendo ser incorporado em modelos mais complexos, como os de crescimento e produção.

Outro modelo tridimensional de interceptação de radiação foi desenvolvido por Green et al. (2003), considerando a interceptação de radiação por um dossel uniforme com folhas verdes distribuídas randomicamente no volume de uma dada forma geométrica. As coordenadas de cada árvore de macieira foram especificadas em três dimensões permitindo investigar o efeito de diferentes padrões de plantio. As árvores foram individualmente referenciadas e representadas por um elipsóide. Todas as folhas foram distribuídas randomicamente com respeito à orientação, inclinação e localização. Uma densidade foliar foi assumida, e a absorção pelos frutos e galhos foi negligenciada por ser inferior a 5% em árvores de macieira completamente enfolhadas (PALMER, 1977). A teoria de cálculo de absorção de radiação solar foi adaptada dos modelos de Norman (1979), Norman e Welles (1983) e Wang e Jarvis, (1990). Os componentes da radiação solar, radiação direta e difusa, foram calculados de medidas da radiação solar global e radiação difusa, mais o saldo de radiação registrado no pomar. A partir desses fluxos de radiação solar, o modelo calculou a absorção da energia radiante direta e difusa para o comprimento de onda

fotossintética (400-700 nm) e em infravermelho próximo (700-3000 nm). Esses comprimentos de onda foram considerados separadamente, pois as propriedades ópticas da folhagem (transmissão, reflexão e absorção) dependem fortemente do comprimento de onda.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Descrição da área experimental

O trabalho foi desenvolvido durante os anos 2004 e 2005 em áreas experimentais do Campus “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (USP), município de Piracicaba, SP, com as coordenadas geográficas: 22°42’ Sul, 47°30’ Oeste e 546 m de altitude.

As áreas experimentais foram constituídas de um pomar de laranjeiras e um cafezal. As laranjeiras eram da variedade Pêra Rio, em espaçamento de 8,0 m x 4,0 m, com altura média de plantas de 3,5 m. As linhas de plantio no trecho de estudo tinham orientação noroeste-sudeste, com azimute de 15°S. A árvore escolhida para o estudo estava em uma linha central da área, apresentando-se vigorosa e sadia, sendo representativa do pomar. O estudo no laranjal ocorreu entre outubro de 2004 e junho de 2005.

Uma área de aproximadamente 0,2 ha do cafezal era constituída de plantas adultas (6 anos após plantio), com renques de altura média de 2,5 m e largura de 1,6 m, variedade Mundo Novo Apuatã, plantadas em espaçamento de 2,5 m x 1,0 m. O restante da área, de aproximadamente 3,2 ha, era constituída de plantas em desenvolvimento (cafezal implantado em outubro de 2001), variedade Obatã IAC 1669-20, espaçados de 3,5 m x 0,9 m. As plantas formavam renques de silhueta em forma de paralelepípedo com orientação noroeste-sudeste, e azimute de 19°S. Os trechos de renques escolhidos para o estudo eram centrais nas áreas, com as plantas sendo representativas da população quanto ao porte e área foliar. O estudo nessas áreas prolongou-se de março de 2004 a maio de 2005.

Tanto as entrelinhas do pomar de laranjeiras quanto do cafezal eram preenchidas com vegetação rasteira, mantida por constantes roçadas, com altura de aproximadamente 15 cm.

2.2.2 Medidas biométricas

Assumindo uma geometria esférica da copa da árvore de laranjeira, determinou-se o diâmetro médio da copa de 3,3 m, pela média das medidas da altura e largura da copa, realizadas manualmente. Tendo-se o diâmetro da copa, determinou-se a área de projeção da copa na superfície horizontal (AP), igual a 8,55 m².

A primeira determinação de área foliar (A_f) para a árvore de laranjeira foi realizada com um medidor portátil de área foliar (LAI-2000 Canopy Analyser, Li-Cor, Lincoln, NE, EUA). Com base nessa primeira avaliação, posteriormente foram feitas quatro desfolhações da árvore, com retirada de cerca de 25%, 50%, 70% e 100% das folhas, com o objetivo de analisar o efeito da densidade de folhagem da copa sobre o seu saldo de radiação. O número de folhas (nf) retiradas foi contado, medindo-se o comprimento (C) e largura (L) de algumas folhas de tamanho mediano características do dossel, sendo os valores médios \bar{C} e \bar{L} adotados como representativo da árvore. Após a última retirada de folhas, procedeu-se o cálculo da área foliar total da árvore pela equação, $A_f = C.L.nf.f$, sendo f o coeficiente de conversão para a área de cada folha igual a 0,7, determinado por Marin (2000) para lima ácida “Tahiti”.

Para a utilização do modelo proposto de estimativa do saldo de radiação para renques de cafezal, mediram-se a altura, (1,1 m) e largura (1,0 m) do renque de cafeeiros em formação. Amostrando-se um trecho de renque de 4,7m de comprimento e, assumindo-se a geometria de renque paralelepípeda, tem-se uma “parede” superior de interceptação da radiação (A_s), de 1,0m x 4,7m, e “paredes” laterais (A_l) de 1,1m x 4,7m. A área de projeção do trecho de renque amostrado (AP) foi de 4,7 m².

Também foram realizadas contagens do número de folhas (nf) de cada planta de cafeeiro, e medidos o comprimento (C) e a largura (L) de algumas folhas de tamanho mediano para o cálculo da área foliar (A_f). A área foliar de cada planta foi também determinada pela equação $A_f = C.L.nf.f$, sendo f igual a 0,6862, determinado por Righi, (2004) para um cafezal em formação, o qual é muito próximo do determinado por Marin (2003) para um cafezal adulto, aproximadamente 0,7.

Nas desfolhações, a retirada manual das folhas foi aleatória e, além disso, foi determinada a porosidade do dossel em cada situação. Para a determinação da porosidade no plano vertical da folhagem, a laranjeira e o renque de cafeeiros foram fotografados em posições diferentes (em

relação aos pontos cardeais), utilizando um tecido branco de fundo e as fotografias digitais analisadas por um software de análise de imagem.

2.2.3 Medidas do saldo de radiação da copa de laranjeira por sistema móvel de integração espaço-temporal.

O sistema móvel de integração do saldo de radiação para uma árvore “isolada” de laranjeira, similar ao descrito por McNaughton et al. (1992) e Angelocci et al. (2004), consistiu de uma armação circular vertical fixada a uma base circular horizontal (Figura 1).



Figura 1 - Sistema de medida do saldo de radiação plantas isoladas

A armação circular vertical, de 4,3 m de diâmetro externo, foi constituída de três tubos de ferro de 20 mm de espessura, em conformação triangular e distantes entre si 75 mm, interligados por pequenos segmentos de ferro soldados em zig-zag. A parte inferior da armação continha uma

abertura permitindo a passagem do tronco da árvore. A estrutura foi construída em três segmentos de tamanhos iguais, unidas por parafusos, facilitando sua montagem e transporte (Figura 1).

A base circular horizontal foi constituída de uma porção externa fixa, construída em chapa de ferro de 5 mm de espessura, e outra interna móvel, de chapa de ferro de 10 mm. Ambas foram divididas em duas seções semi-círculo, que quando unidas formavam um círculo ao redor do tronco da árvore.

A porção externa da base tinha as paredes laterais em formato de “L” para sustentar a porção interna, e foi fixada ao solo por hastes metálicas de 45 mm de espessura, a 0,4 m de altura.

Na porção interna, em formato de “L” invertido, foram fixadas três rodas metálicas de 60 mm de largura e 60 mm de diâmetro, espaçadas 120° entre si, rodando internamente sobre a porção externa. Para sustentação do equipamento durante seu funcionamento, foram instaladas outras três rodas formadas por rolamentos automotivos de 30 mm de diâmetro, fixadas abaixo das rodas maiores, restando entre elas apenas a porção externa da base, impedindo oscilações laterais da armação circular vertical. Para centralizar o movimento rotacional da porção interna da base, instalaram-se ainda cinco estruturas compostas de rodas metálicas (Figura 2).

Para proporcionar o movimento de rotação à estrutura, uma engrenagem constituída de chapa de ferro de 10 mm de espessura, foi horizontalmente soldada na extremidade inferior da porção interna da base, ligando-a por uma corrente metálica à engrenagem da caixa de redução de rotação, instalada em uma armação fixada lateralmente à estrutura da base (Figura 2).

A transferência de torque à caixa de redução de rotação foi realizada por um motor a quatro tempos, marca Branco, movido a gasolina, de 6,5 HP de potência, fixado na mesma estrutura da caixa de redução de rotação. O motor dispunha de polia de 75 mm de diâmetro, interligada por correia automotiva à polia da caixa de redução de rotação de 250 mm de diâmetro, proporcionando movimento de três rotações por minuto ao equipamento (Figura 2).

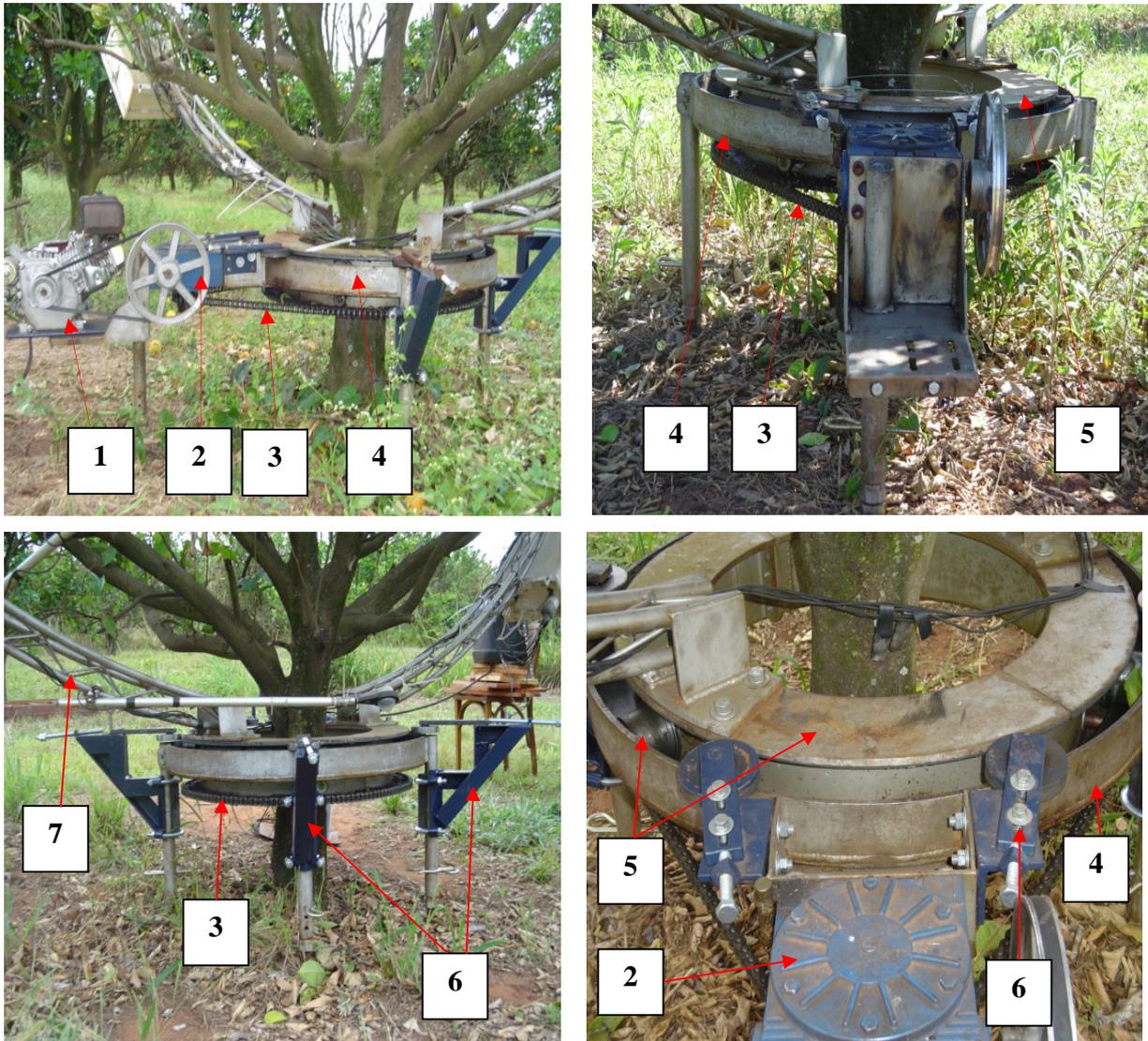


Figura 2 - Motor (1), caixa de redução de rotação (2), corrente metálica ligada à engrenagem da caixa de redução de rotação e da base interna móvel (3), base externa fixa (4), base interna móvel com rodas metálicas (5), sistema de centralização da base interna (6), armação circular vertical fixada a base interna móvel (7)

De acordo com o proposto por McNaughton et al. (1992) e Angelocci et al. (2004), foram instalados oito saldo-radiômetros, marca REBS (Radiation and Balance System, Seattle, USA), modelo Q*7, distribuídos equidistancialmente em intervalos de $22,5^\circ$. Devido ao corte realizado na porção inferior da armação vertical para passagem do caule da árvore, o primeiro saldo-radiômetro foi instalado a $78,75^\circ$ S (convenção geográfica usada para determinar a posição de cada saldo-radiômetro na esfera descrita pelo seu movimento de rotação, ou seja, a “esfera sensora”). Os saldo-radiômetros foram fixados de modo a se ter os quatro superiores num

quadrante em oposição aos quatro inferiores, minimizando os erros de medida decorrentes das possíveis variações dos valores de radiação incidente no intervalo de tempo de uma rotação, principalmente por variação rápida da cobertura de nuvens (Figura 3).

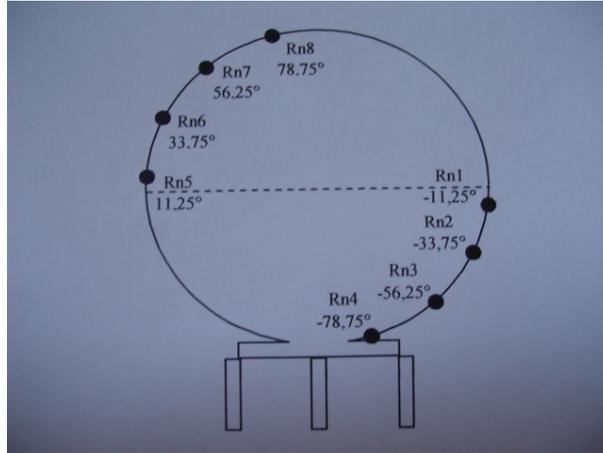


Figura 3 - Distribuição dos oito saldo-radiômetros na armação vertical seguindo a convenção geográfica

Evitando que a armação circular vertical ocupasse uma porção significativa do campo de visada dos saldo-radiômetros, esses foram fixados a uma distância (l) de 800 mm medidos entre o centro da placa sensora dos saldo-radiômetros e o ponto de fixação na armação vertical. O raio formado entre o ponto de fixação do saldo-radiômetro na armação circular vertical e o centro da esfera de montagem, chamado de raio de montagem (L_m), foi de 2,15 m, e a esfera desse raio de “esfera de montagem”. Fixados nessa posição, os saldo-radiômetros tiveram que ser posicionados com suas placas sensoras tangenciando uma esfera nomenclada, também denominada de “esfera sensora”. O raio da “esfera sensora” (L_s) foi então de $L_s^2 = L_m^2 - l^2$, ou seja, 1,99 m. Então, para que os sensores tangenciassem a “esfera sensora” foi necessário incliná-los internamente em 22° , de acordo com a eq. (1):

$$\text{sen } \alpha = \frac{l}{L_m} \quad (1)$$

em que α é o ângulo de inclinação interna dos saldo-radiômetros; l o comprimento do braço dos saldo-radiômetros; L_m o raio de montagem.

Com o comprimento de braço dos sensores de 800 mm, maximizou-se a distância entre sensor e armação, montando-os perpendicularmente à armação vertical, exceto nas duas extremidades (latitudes de $+78,75^\circ$ e $-78,75^\circ$). Nessas duas latitudes, o círculo da latitude tem

raio menor que comprimento do braço do saldo-radiômetro. Para posicionar os sensores nessas latitudes outro critério foi adotado (McNAUGHTON et al., 1992):

$$\text{sen } a = \frac{\text{sen}[(\pi / 2) - \theta_m] L_m}{l} \quad (2)$$

onde a é o ângulo de montagem formado entre a armação circular vertical e o braço do saldo-radiômetro; θ_m é a latitude de montagem do saldo-radiômetro; L_m o raio de montagem; l o comprimento do braço do saldo-radiômetro, sendo que o ângulo de montagem (a) em relação à armação circular foi de 60° .

A Tabela 1 mostra os detalhes de montagem dos sensores em cada “hemisfério” da “esfera sensora”. Cada sensor amostra diferentes áreas laterais da “esfera sensora”.

Tabela 1 - Valores das variáveis utilizadas na montagem dos sensores e a área lateral de amostragem de cada um

Latitude de medida (θ_s)	Latitude de montagem (θ_m)	Ângulo de montagem na armação (a)	Área lateral de amostragem (m^2)
$\pm 78,75^\circ$	$\pm 71,1^\circ$	60	1,675
$\pm 56,25^\circ$	$\pm 63,6^\circ$	90	5,525
$\pm 33,75^\circ$	$\pm 36,7^\circ$	90	8,150
$\pm 11,25^\circ$	$\pm 12^\circ$	90	9,650

Para determinar as latitudes de montagem dos sensores na armação circular vertical para que esses estejam nas latitudes de medida escolhidas de $11,25^\circ$, $33,75^\circ$, $56,25^\circ$ nos dois hemisférios, utilizou-se a eq. (3). Nas latitudes de $78,75^\circ$, pelo comprimento da haste do saldo-radiômetro ser maior que o raio da circunferência nessa latitude, utilizou-se a eq. (4) (McNAUGHTON et al., 1992):

$$\theta_m = \text{sen}^{-1} \left(\frac{L_m}{(L_m^2 - l^2)^{1/2}} \text{sen} \theta_s \right) \quad (3)$$

$$\theta_m = \text{sen}^{-1} \left(\frac{(L_m^2 - l^2)^{1/2}}{L_m \text{sen} \theta_s} \right) \quad (4)$$

onde θ_s é a latitude de medida do sensor; θ_m a latitude de montagem do sensor; l o comprimento do braço do sensor; L_m o raio de montagem.

A integração do saldo de radiação para a árvore de laranjeira (Rnl) foi realizada, então, pela soma das medidas de cada saldo-radiômetro multiplicadas pelas respectivas áreas laterais de amostragem, eq. (5) (Tabela 1):

$$Rnl = \sum_{i=8}^8 Rn_i \cdot Am_i \quad (5)$$

em que Rn_i é o saldo de radiação medido por cada saldo-radiômetro em sua latitude de medida; Am_i é a área lateral de amostragem nessa latitude.

O sistema permanecia em movimento rotacional durante o período diurno e um sistema de aquisição de dados da marca Campbell, modelo CR23X, acoplado a armação circular vertical, executava medidas dos oito saldo-radiômetros a cada segundo, armazenando médias de 15 minutos. Verificou-se que no período noturno não havia diferença significativa dos valores integrados estando o sistema parado ou em movimento.

Adicionalmente aos oito saldo-radiômetros, para medida da radiação solar abaixo da copa da árvore de laranjeira (I), instalou-se internamente na armação vertical, distante 0,65 m do tronco da árvore, um piranômetro marca Li-Cor, modelo LI-200, e para medida do albedo (α) um piranômetro marca Kipp & Zonen, modelo CM-3, invertido sobre a copa da árvore, fixado na parte superior interna da armação circular vertical. Ambos piranômetros tiveram as medidas registradas a cada segundo pelo sistema de aquisição de dados, armazenando média de 15 minutos. Essas duas medidas foram utilizadas na modelagem do saldo de radiação da copa, conforme descrito à frente.

2.2.4 Medida do saldo de radiação de um trecho de renque de cafeeiros por sistema móvel de integração espaço-temporal.

A Figura 4 ilustra o sistema móvel de medida do saldo de radiação com dois arcos metálicos. Um externo, fixo à estrutura, de 1,15 m de raio, utilizado para medidas nos cafeeiros adultos, e outro interno, com 0,73 m de raio, fixado por parafusos ao arco maior, facilmente removível, possibilitando uma melhor estimativa do saldo de radiação para um cafezal em formação.



Figura 4 - Sistema de medida do saldo de radiação para renques de cafeeiros

Os saldo-radiômetros foram instalados em intervalos de 45° entre si, no arco circular de alumínio de 1,15 m de raio para o cafezal adulto, e no arco de 0,73 m de raio para o cafezal em formação, posicionados em torno do renque de maneira que suas placas sensoras tangenciassem uma superfície hipotética curvilínea em torno da copa das plantas, de modo que o deslocamento dos sensores na linha do renque gerasse uma geometria cilíndrica de medida (“cilindro nocional”) (Figura 5).

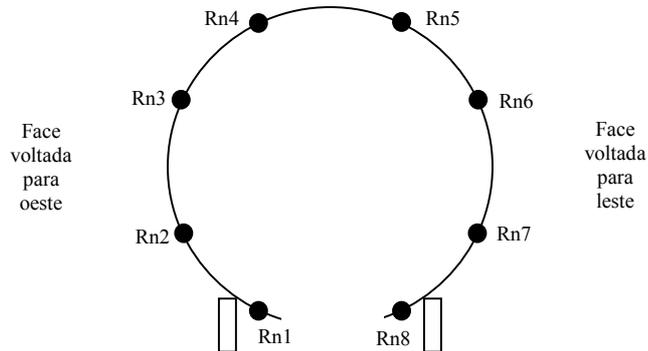


Figura 5 - Distribuição dos oito saldo-radiômetros no arco circular vertical

O arco de 1,15 m de raio foi soldado sobre duas bases móveis providas de duas rodas metálicas cada, suspensas sobre trilhos de 6,95 m de comprimento, dispostos paralelamente. Para proporcionar movimento ao equipamento, fixou-se na extremidade de um dos trilhos um motor elétrico de 0,5HP, acoplado a uma caixa redutora de rotação dotada de uma polia dentada de saída. Na outra extremidade do mesmo trilho, instalou-se uma polia dentada idêntica a do sistema de redução de rotação. Uma corrente metálica fazia a ligação entre as duas polias.

Na base móvel de fixação do arco, posicionada sobre o trilho onde se instalou o sistema de movimentação, soldou-se um retângulo metálico vazado internamente. Da corrente metálica retiraram-se dois pinos de união, inserindo-se no lugar parafusos com comprimento suficiente para atravessar o retângulo vazado. Fixou-se então os parafusos a uma peça metálica, instalada externamente ao retângulo vazado, de forma que com o movimento da corrente, os parafusos tracionassem o suporte móvel, executando o percurso de ida e volta em 4,7 m de renque a cada 40 segundos. A inversão do movimento de ida e volta do sistema foi proporcionada automaticamente pela alternância do sentido de deslocamento dos parafusos, conforme o deslocamento da corrente metálica (Figura 6).

O saldo de radiação do trecho do renque foi obtido pela integração da medida dos oito saldo-radiômetros, considerando-se que cada um deles representa a medida de $1/8$ da área lateral do cilindro nocional ou cilindro “sensor” de medida (excetuando a área plana das duas bases). Desse modo, o saldo de radiação medido por um trecho de renque (Rnc) foi calculado:

$$Rnc = \left(\frac{1}{8} \sum_{i=8}^8 Rn_i \right) d_h \cdot 2 \cdot R \cdot \pi \quad (6)$$

em que: Rn_i é a medida de saldo de radiação de cada um dos oito saldo-radiômetros, d_h é a distância horizontal percorrida pelo sistema (4,7m) e R é o raio da base do cilindro sensor.

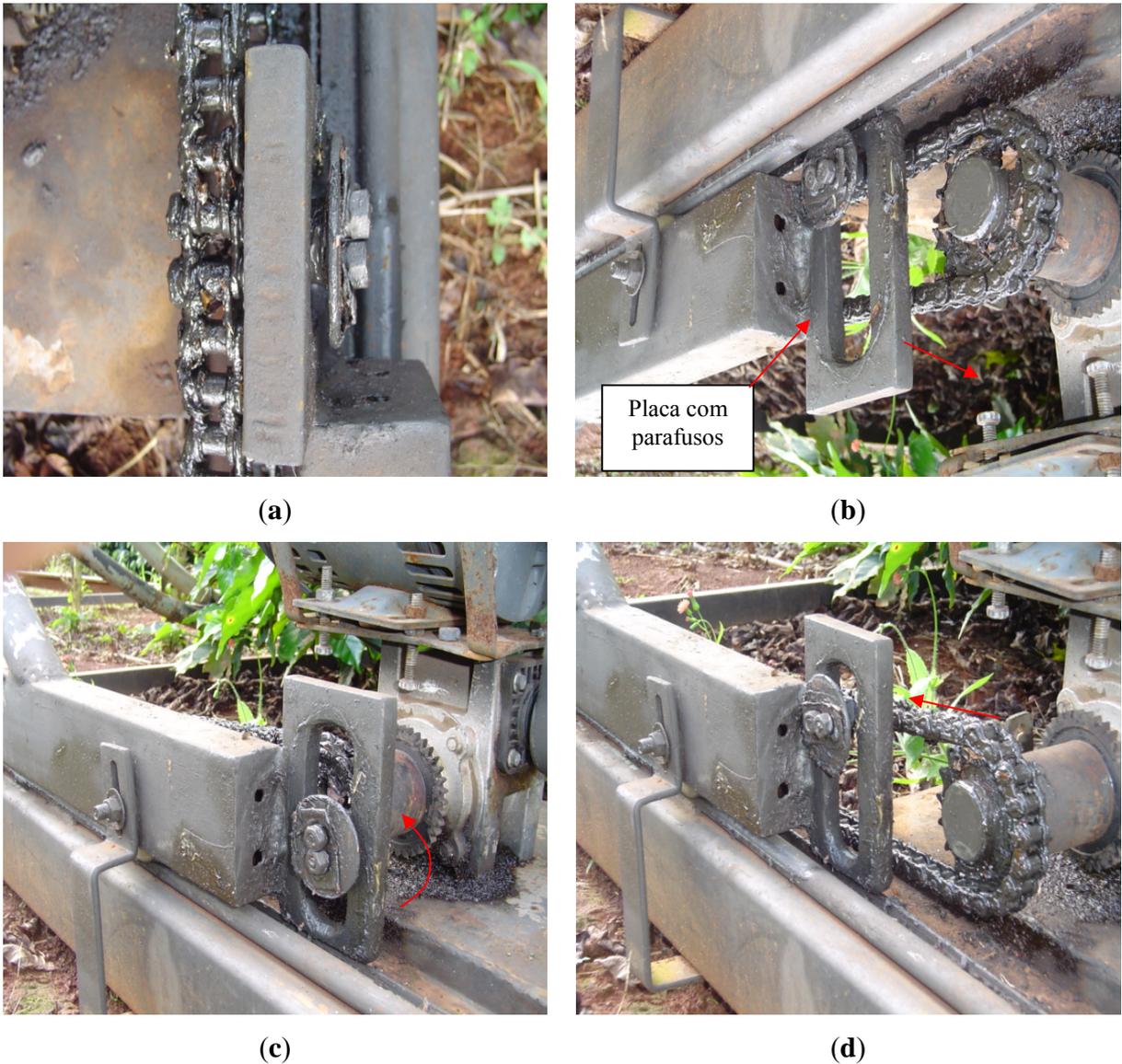


Figura 6 - Vista de topo dos parafusos inseridos na corrente atravessando o retângulo vazado, responsável pelo tracionamento do equipamento (a), e o sistema de inversão de movimento junto à extremidade onde está acoplado o motor elétrico e a caixa de redução de rotação (b), (c) e (d). As setas indicam o movimento da corrente, invertendo-se o seu sentido com a alternância do sentido dos parafusos. Sistema idêntico encontra-se na extremidade oposta

Para alinhar os saldo-radiômetros no cilindro nocional, fixavam-se os sensores paralelamente às suas estruturas de montagem, formadas por uma placa metálica com duas abraçadeiras, que quando presas ao arco metálico tangenciavam o cilindro nocional. Dessa forma, com os saldo-radiômetros devidamente alinhados e com o sistema funcionando durante o período diurno, realizaram medidas a cada segundo, armazenando valores médios do saldo de radiação a cada 15 minutos dos oito sensores. Para esse armazenamento utilizou-se um sistema de aquisição de dados marca Campbell, modelo CR23X.

Na porção superior do arco metálico, na posição central do renque, instalou-se um piranômetro marca Kipp & Zonen, modelo CM-3, visando a folhagem do renque, medindo o albedo (α) dos cafeeiros. Abaixo do trecho de renque de cafezal amostrado, instalaram-se dois tubo-solarímetros, previamente calibrados, com elemento sensor medindo 245 mm x 25 mm, no sentido do renque, entre duas plantas na linha de plantio, para a medida da radiação solar global abaixo do renque (I), medidas essas que subsidiaram a modelagem do saldo de radiação da copa. Tanto o piranômetro quanto os tubos solarímetros foram ligados a um sistema de aquisição de dados marca Campbell, modelo 21X(L), registrando medidas a cada segundo, e armazenando média de 15 minutos.

2.2.5 Medidas da irradiância solar global, radiação solar difusa e saldo de radiação de gramado.

Os dados de irradiância solar global e saldo de radiação de gramado foram obtidos junto ao posto meteorológico do Departamento de Ciências Exatas, ESALQ/USP, distante aproximadamente 150 m do cafezal e 800 m do laranjal.

Para a medida da radiação solar difusa, utilizou-se um equipamento desenvolvido por Oliveira; Machado e Escobedo (2002). Um piranômetro marca Eppley foi instalado sob uma banda metálica de sombreamento fixa (Figura 7). Com a alteração do local de sombreamento devido ao movimento de declinação solar, deslocava-se o piranômetro manualmente no sentido N-S, de maneira a manter sua placa sensora plenamente à sombra. Os valores de radiação difusa foram corrigidos devido à área de visada do céu obstruída pela banda metálica de sombreamento.



Figura 7 - Sistema para medida da radiação solar difusa dotado de uma banda metálica de sombreamento

2.2.6 Estimativa do saldo de radiação para árvore de laranjeira e renque de cafezal utilizando a lei de Beer.

A estimativa do saldo de radiação para a árvore “isolada” de laranjeira (R_{nl}) e para o trecho de renque de cafezal (R_{nc}) foi baseada na lei de Beer:

$$R_{nc}, R_{nl} = R_g \cdot (1 - \alpha) \cdot (1 - e^{-k \cdot IAF}) \cdot AP \quad (7)$$

em que R_g é a irradiância solar global; α o albedo do dossel; k o coeficiente de extinção; IAF o índice de área foliar; AP a área projetada da copa da laranjeira ou do renque de cafezal sobre o solo.

O coeficiente de extinção (k), foi determinado com base no índice de área foliar:

$$k = \frac{-\ln(I / R_g)}{IAF} \quad (8)$$

em que: R_g é a densidade de fluxo de radiação solar global incidente na árvore de laranjeira ou no renque de cafeeiros, medida no posto meteorológico; I é a medida da radiação solar global abaixo da copa da árvore e do renque; e IAF o índice de área foliar.

2.2.7 Modelo de estimativa do saldo de radiação para plantas “isoladas” de laranjeira

O modelo proposto de estimativa do saldo de radiação para a laranjeira é baseado na adoção de que a copa pode ser representada por um sólido geométrico com o qual a radiação solar (direta mais difusa) interage, considerando-se duas aproximações: a) devido ao largo espaçamento das linhas do pomar (8,0 m x 4,0 m), o sombreamento causado por plantas no entorno daquela estudada pode ser desconsiderado; b) o balanço de ondas longas também é desconsiderado, por se assumi-lo desprezível durante o período diurno, pelo fato de que as temperaturas da folhagem das plantas em estudo, das plantas vizinhas e superfície vegetada circundando as plantas do pomar são muito próximas, apresentando também poder emissivo muito similar. Além disso, a temperatura do ar na camada próxima à superfície é similar à dos corpos citados, assumindo-se que a quantidade de energia de onda longa emitida é muito próxima da absorvida, fazendo com que o balanço de onda longa contribua pouco para o saldo de radiação no período diurno.

A forma da copa foi considerada como sendo aquela descrita na Figura 8, considerando-se uma superfície esférica, descontada de uma calota na parte inferior. Essa calota é vazia de vegetação, pois na base da copa da árvore, juntamente ao caule e inserção dos ramos principais ou “pernadas” normalmente há ausência de folhagem.

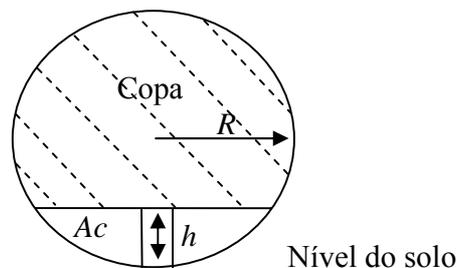


Figura 8 – Esfera nocional de raio R integrando a copa da árvore, com o hemisfério inferior desprovido de folhagem, formando uma calota vazia (A_c), de raio R e altura h

Assumindo-se, em princípio que a área lateral é correspondente a uma esfera de raio R , tem-se:

$$Rn_l = Rg \cdot (4 \cdot \pi \cdot R^2) \quad (9)$$

Nessa situação, assume-se que apenas metade da esfera interceptará tanto radiação solar direta (Rg_o) quanto difusa (Rg_d), restando apenas a interceptação da radiação solar difusa para a metade restante.

$$Rnl = [(Rg_o + Rg_d) \cdot (2 \cdot \pi \cdot R^2)] + (Rg_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot R^2) \quad (10)$$

A radiação solar incidirá na área lateral da esfera, da qual deverá ser subtraída uma área que é função da porosidade da copa da árvore (p).

$$Rnl = [(Rg_o + Rg_d) \cdot (2 \cdot \pi \cdot R^2) \cdot (1 - p)] + [(Rg_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot R^2) \cdot (1 - p)] \quad (11)$$

Como a área de interceptação não se apresenta perfeitamente perpendicular à radiação solar direta incidente, assume-se um ângulo médio de inclinação desta área de 45° em relação ao feixe de radiação. Multiplicando-se então a área de interceptação pelo cosseno de sua inclinação média.

$$Rnl = [Rg_o \cdot (2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \cos 45^\circ) \cdot (1 - p)] + [(Rg_d \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2) \cdot (1 - p)] \quad (12)$$

Além de uma porcentagem da radiação solar incidente não ser absorvida devido à porosidade da copa, outra parte é refletida pelas folhas da copa em função do albedo (α), devendo ser descontada.

$$Rnl = [Rg_o \cdot (4,44 \cdot R^2) \cdot (1 - p) \cdot (1 - \alpha)] + [(Rg_d \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2) \cdot (1 - p) \cdot (1 - \alpha)] \quad (13)$$

Exclui-se ainda a área da calota vazia de vegetação (Ac), ou seja, sem folhagem para interceptar e absorver a energia radiante:

$$Ac = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h \quad (14)$$

em que R é o raio da esfera e h a altura da calota.

A radiação solar difusa incidente nessa área do hemisfério inferior da copa (Ac) deve ser subtraída da radiação solar difusa absorvida pela área total da esfera.

$$Rnl = [Rg_o \cdot (4,44 \cdot R^2) \cdot (1 - p) \cdot (1 - \alpha)] + \{[(Rg_d \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2) \cdot (1 - p) \cdot (1 - \alpha)] - [Rg_d \cdot Ac] \cdot (1 - p) \cdot (1 - \alpha)\} \quad (15)$$

Com a eq. (15), é possível estimar-se o saldo de radiação da planta “isolada” de laranjeira, assumindo-se uma geometria de copa esférica, computando-se apenas o balanço de energia radiante de onda curta.

A aproximação de que a metade da área lateral da esfera estará sempre interceptando radiação direta pode levar a uma superestimativa da radiação direta interceptada, pois na realidade a área lateral da copa recebendo radiação direta não é durante o dia todo equivalente aquela de uma meia esfera. Por outro lado, o modelo contém uma outra aproximação, que é a

desconsideração da radiação global refletida pelas adjacências (solo, por exemplo) em direção à árvore, o que deve resultar em uma subestimativa da radiação interceptada. Em função disso, adotou-se como hipótese preliminar, que há uma compensação dessas duas fontes de erros.

O modelo foi aplicado a intervalos de 15 minutos e os valores integrados para o período das 6:00 às 18:00 horas.

2.2.8 Modelo de estimativa do saldo de radiação para renques de cafeeiros

O modelo foi desenvolvido para determinar o saldo de radiação de um cafezal conduzido em renques, aproveitando-se de algumas premissas do modelo proposto por Riou et al. (1989), envolvendo a geometria do renque, a porosidade e o albedo do dossel, a orientação dos renques e do Sol, e a separação da interceptação da radiação solar direta e difusa.

2.2.8.1 Interceptação de radiação solar direta pelo renque

Assumindo-se que a folhagem do renque de cafezal apresenta uma geometria simples (paralelepípedo), têm-se como áreas de interceptação da radiação solar direta a “parede” horizontal ou superior, e as “paredes” verticais ou laterais do renque.

A radiação solar direta (Rg_o) interceptada pela “parede” horizontal (Ih) é diretamente influenciada pelo ângulo de elevação do sol (h), pois à medida que o ângulo de elevação do sol torna-se maior, essa radiação aprofunda-se no dossel. O ângulo de elevação do sol também influencia a interceptação pelas “paredes” verticais (Iv), sendo influenciada ainda pelo azimute do sol (a) e do renque (a'), ou seja (Figura 9):

$$Ih = As \cdot \text{sen}(h) \cdot Rg_o \quad (16)$$

$$Iv = Al \cdot \text{cos}(h) \cdot \text{sen}(a - a') \cdot Rg_o \quad (17)$$

em que As é a área da “parede” horizontal e Al a área das “paredes” verticais.

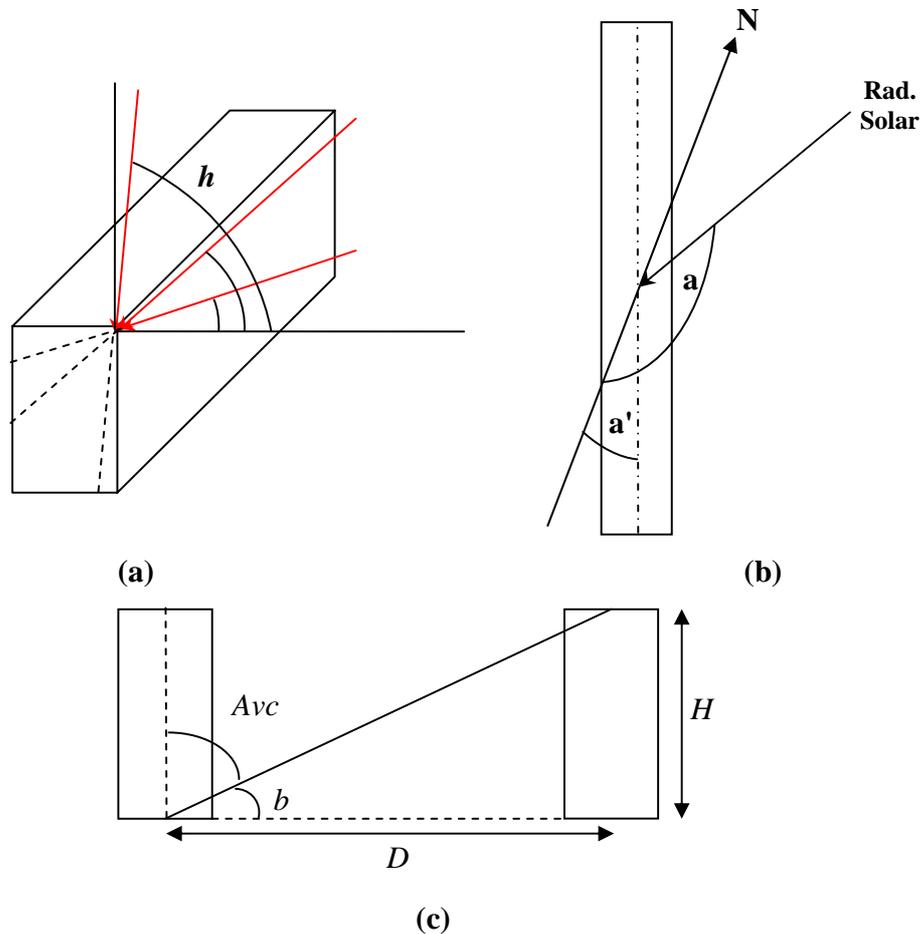


Figura 9 - Descrição da altura solar (h) (a), do azimute do renque (a') e do sol (a) (b); e da área de visada do céu (Avc) (c.)

Como a “parede” horizontal do renque não tem a interceptação de radiação solar influenciada pela orientação de plantio, ou seja, pelo azimute do renque, e também pelos renques laterais, a interceptação da radiação solar direta e difusa é tratada conjuntamente, determinando-se a interceptação da radiação solar global (R_g).

$$I_h = A_s \cdot \text{sen}(h) R_g \quad (18)$$

No volume do paralelepípedo ou renque, as folhas distribuem-se randomicamente, freqüentemente não o preenchendo totalmente, formando assim espaços vazios, cujo valor integrado representa a porosidade da parede vertical do renque (p). Além da perda em radiação solar direta por essa porosidade do renque, outra porcentagem é eliminada através da reflexão ocorrida na folhagem (α). Portanto, para proceder-se a estimativa do saldo de radiação de ondas

curtas deve-se considerar estas reduções, tanto para as “paredes” verticais como para a horizontal, ou seja:

$$I_v = Al \cdot \cos(h) \cdot \text{sen}(a - a') \cdot [Rg_o \cdot (1 - p) \cdot (1 - \alpha)] \quad (19)$$

$$I_h = As \cdot \text{sen}(h) \cdot [Rg \cdot (1 - p) \cdot (1 - \alpha)] \quad (20)$$

Através das equações 19 e 20 é possível determinar-se a interceptação da radiação pelas “paredes” do renque. Para estimar a energia absorvida pelo renque procedeu-se a inclusão de um coeficiente de extinção da radiação solar global (k'), eq. (21):

$$k' = \frac{(Rg - I)}{Rg} \quad (21)$$

$$I_v = Al \cdot \cos(h) \cdot \text{sen}(a - a') \cdot [Rg_o \cdot (1 - p) \cdot (1 - \alpha)] \cdot k' \quad (22)$$

$$I_h = As \cdot \text{sen}(h) \cdot [Rg \cdot (1 - p) \cdot (1 - \alpha)] \cdot k' \quad (23)$$

2.2.8.2 Interceptação de radiação solar difusa pelo renque

2.2.8.2.1 Caso das “paredes” horizontais

A interceptação pela “parede” horizontal superior já está inclusa na eq. (18). A interceptação de radiação difusa pela “parede” horizontal inferior do paralelepípedo não foi considerada na interceptação total de radiação difusa pelo renque, pois é dependente de uma fração de radiação difusa que é limitada pelos renques vizinhos e pelo próprio renque estudado, do albedo do solo e do albedo de sua folhagem, tornando-a desprezível.

2.2.8.2.2 Caso das “paredes” verticais

A interceptação da radiação difusa pelas “paredes” verticais do renque é dependente da porcentagem de área visada do céu (Avc), que por sua vez é dependente do espaçamento entre renques (D), e de sua altura (H), ou seja (Figura 9_c):

$$A_{vc} = \frac{180 - \left(2 \cdot \arctg \frac{H}{D} \right)}{180} \quad (24)$$

Utilizando-se da eq. (24), com D de 3,5 m e H de 1,1 m, determinou-se A_{vc} igual a 0,806.

Independentemente do azimute do renque (a') e do sol (a), as componentes verticais estarão interceptando radiação solar difusa (R_{g_d}). A totalidade da radiação solar difusa absorvida por essas duas componentes é dependente, então, da porosidade e do albedo do renque, da porcentagem de área visada do céu e do coeficiente de extinção de radiação (k').

$$I_{V_{R_{g_d}}} = 2 \cdot Al \cdot R_{g_d} \cdot (1 - p) \cdot (1 - \alpha) \cdot A_{vc} \cdot k' \quad (25)$$

Desta forma, estima-se o saldo de radiação para renques de cafezal, computando-se apenas o balanço de energia radiante de ondas curtas da componente horizontal superior e das componentes verticais do renque, conforme as equações 22, 23, 24 e 25.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Variação temporal do saldo de radiação de uma laranjeira medida pelos saldo-radiômetros nas diferentes latitudes

A estrutura do sistema móvel de integração espaço-temporal do saldo de radiação utilizado para árvores “isoladas” era muito similar ao equipamento desenvolvido e utilizado por McNaughton et al. (1992), com o mesmo posicionamento dos oito saldo-radiômetros na armação circular vertical, em ambos os casos. Aqueles autores fizeram testes sobre gramado, mas com o sistema não contendo plantas em seu interior, de maneira a se ter a magnitude de erro causado pelo efeito da própria estrutura móvel (por exemplo, reflexões de radiação), e por falta de exato balanceamento entre radiômetros opostos (“erro de compensação”). Verificaram que esse tipo de erro foi inferior a cerca de 5% da radiação de todos os componentes de onda absorvida pela árvore e, com base nesse dado e na similaridade dos procedimentos de montagem deste trabalho com o da Nova Zelândia, adotou-se ter havido idêntica magnitude do erro de compensação.

As medidas do saldo de radiação da árvore de laranjeira iniciaram-se em outubro de 2004, estendendo-se ao mês de dezembro, num total de 19 dias. Entre os meses de maio de junho de 2005, realizaram-se mais 19 dias de medidas. A área foliar da laranjeira, estimada pelo medidor

de área portátil em 2004, foi igual à determinada por contagem de folhas em 2005, de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$. A Figura 10 apresenta exemplos da evolução temporal do valores de Rnl em cada posição de medida em torno da copa de laranjeira nos dias 280 e 314 de 2004, e 133 de 2005, para o período diurno, levando a valores integrados para o período de 6:00 as 18:00 horas respectivamente, de $140,2 \text{ MJ} \cdot \text{árvore}^{-1} \cdot 12\text{h}^{-1}$, $156,0 \text{ MJ} \cdot \text{árvore}^{-1} \cdot 12\text{h}^{-1}$ e $153,6 \text{ MJ} \cdot \text{árvore}^{-1} \cdot 12\text{h}^{-1}$.

Através das desfolhações da árvore foi possível avaliar o efeito da densidade de área foliar da copa sobre seu saldo de radiação. Reduzindo-se a área foliar de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ para $27,3 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (dia 160), $18,2 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (dia 164) e $12,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (dia 168), obteve-se, então, saldos de radiação da laranjeira, para o período diurno, de $107,1 \text{ MJ} \cdot \text{árvore}^{-1} \cdot 12\text{h}^{-1}$, $80,3 \text{ MJ} \cdot \text{árvore}^{-1} \cdot 12\text{h}^{-1}$ e $63,0 \text{ MJ} \cdot \text{árvore}^{-1} \cdot 12\text{h}^{-1}$, respectivamente (Figura 10).

As curvas de medida dos oito saldo-radiômetros foram diretamente associadas às latitudes de medida de cada sensor (Tabela 1). Durante o período diurno, os quatro sensores de latitudes positivas (Figura 3) apresentaram medidas diretamente proporcionais à irradiância solar global (R_g), com valores positivos, enquanto os sensores posicionados nas latitudes negativas (Figura 3), apresentaram valores negativos de Rnl (Figura 10), da mesma forma observada por McNaughton et al. (1992), na integração espaço-temporal do saldo de radiação de uma árvore de *Robinia pseudoacacia*, na Nova Zelândia (latitude local de $40^\circ 12' \text{ S}$) com valores máximos de $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ registrados pelo sensor na latitude de $78,75^\circ$. Angelocci et al. (2004), medindo do saldo de radiação de uma árvore de lima ácida “Tahiti”, em Piracicaba (latitude local de $22^\circ 42' \text{ S}$) com o sistema similar ao de McNaughton et al. (1992), apresentam curvas de medidas dos oito sensores também similares às obtidas, com valores de até $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ e $-250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ para as latitudes de $78,75^\circ$ e $-78,75^\circ$, respectivamente. Esses valores máximos dependem, evidentemente, da época do ano, como pode-se observar na comparação dos dias 133, 280 e 314, além das latitudes locais.

As reduções da área foliar da copa da laranjeira praticamente não alteraram as curvas de medidas do saldo-radiômetro instalado na latitude de $78,75^\circ$, posicionado quase que horizontalmente sobre a copa da árvore (Figura 10). Correlacionando o saldo de radiação medido por esse sensor à irradiância solar global, entre 10:00 e 14:00h, verificou-se uma redução inferior a 4% para o dia de medida com AF de $12,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$, em relação a AF de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$.

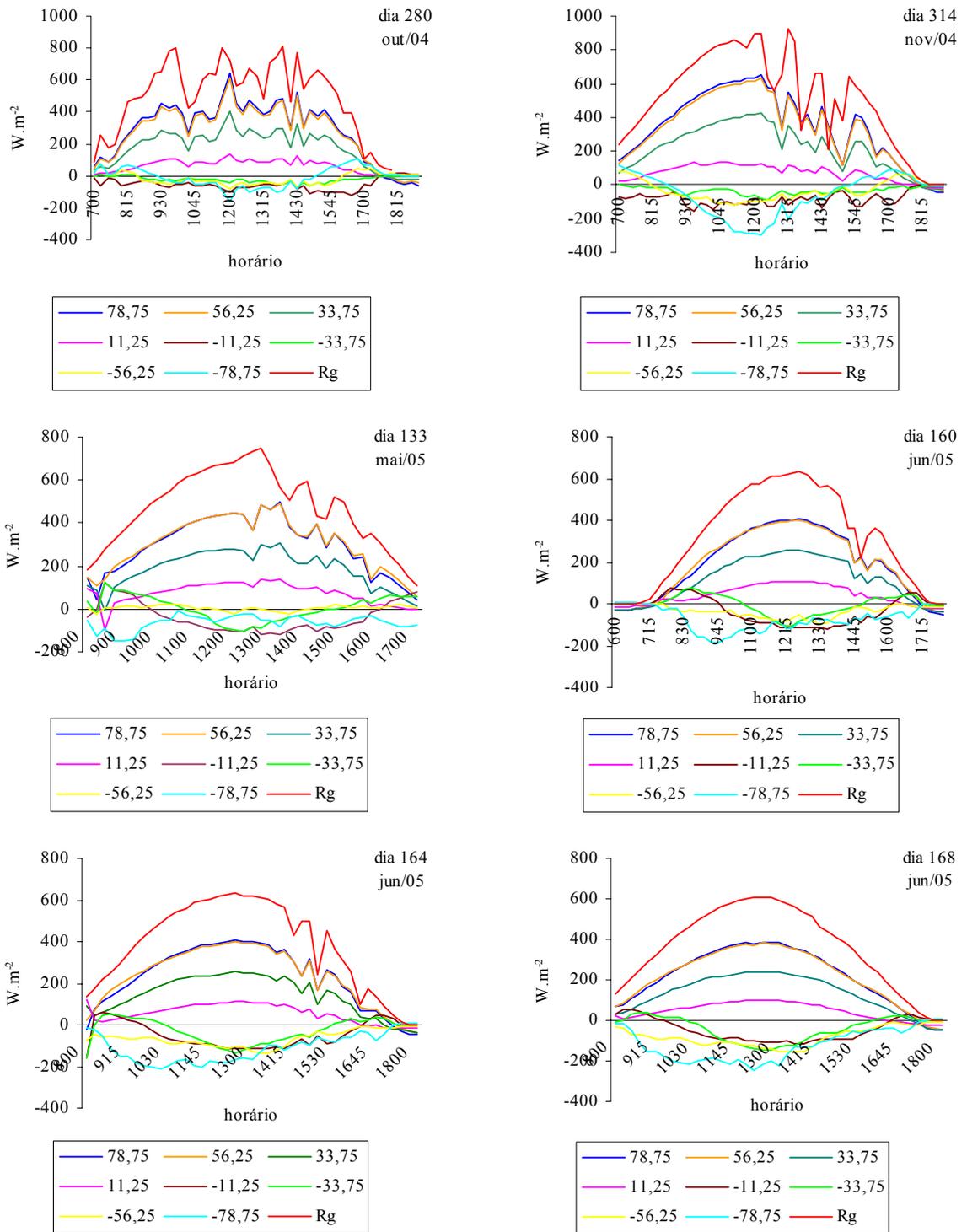


Figura 10 - Evolução temporal das medidas dos saldo-radiômetros em cada latitude de medida, para a árvore de laranja, nos dias julianos 280, 314 e 133 (AF de 37,0 m².árvore⁻¹), dia 160 (AF de 27,3 m².árvore⁻¹), dia 164 (AF de 18,2 m².árvore⁻¹) e dia 168 (AF de 12,0 m².árvore⁻¹), no período diurno

O saldo de radiação nas latitudes de medida, $-11,25^\circ$, $-33,75^\circ$, $-56,25^\circ$ e $-78,75^\circ$ foi negativo praticamente ao longo de todo período diurno (Figura 10). A radiação solar ao atravessar a copa da árvore incidia diretamente sobre esses sensores, somada à energia radiante emitida pela folhagem, não sendo contrabalanceada pela soma da radiação solar difusa incidente no hemisfério inferior da esfera sensora e da radiação emitida pela superfície e árvores circundantes.

Avaliando-se apenas as curvas de medida do sensor na latitude de $-78,75^\circ$, verifica-se a influência da área foliar na formação do saldo de radiação. As perdas registradas nessa latitude, no período diurno, foram em média 22,2% superior para a AF de $12,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ em relação a AF de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (Figura 10).

As curvas de medida dos oito saldo-radiômetros para as áreas foliares de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (dias 314-315), $18,2 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (dias 165-166) e $12,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (dias 173-174), no período noturno, são inversas aos registros diurnos, ou seja, os sensores das latitudes positivas, que apresentavam os maiores ganhos em energia radiante, passaram a apresentar os valores mais negativos de saldo de radiação. Essa perda em energia radiante resulta da emissão da laranjeira, não contrabalanceada pela energia radiante proveniente da atmosfera no período noturno (Figura 11). O saldo de radiação do sensor na latitude de $78,75^\circ$ foi muito similar ao saldo de radiação de gramado (Rng), registrando-se para os demais sensores valores mais positivos, em função da geometria da copa e do arranjo de plantas no pomar, conferindo um balanço de radiação noturno menos negativo da laranjeira.

Já os dados dos sensores posicionados nas latitudes negativas, demonstram que emissão de energia radiante pela laranjeira foi anulada pela emissão da superfície e das plantas circundantes, registrando-se para a latitude de $-78,75^\circ$ saldo de radiação levemente positivo ao longo de todo período noturno (Figura 11).

Realizou-se ainda a medida do saldo de radiação posteriormente à desfolha total da árvore (dia juliano 175 de 2005). Os padrões das curvas de medida de cada sensor foram similares aos observados para medidas com folhagem, destacando-se, porém, curvas acentuadamente mais negativas ao longo de todo período diurno para os sensores em latitudes negativas, devido a ausência das folhas para interceptação da radiação ao longo do dossel. O saldo integrado de radiação para o período em que ele era positivo foi de $46,5 \text{ MJ} \cdot \text{árvore}^{-1} \cdot 10\text{h}^{-1}$ (Figura 11).

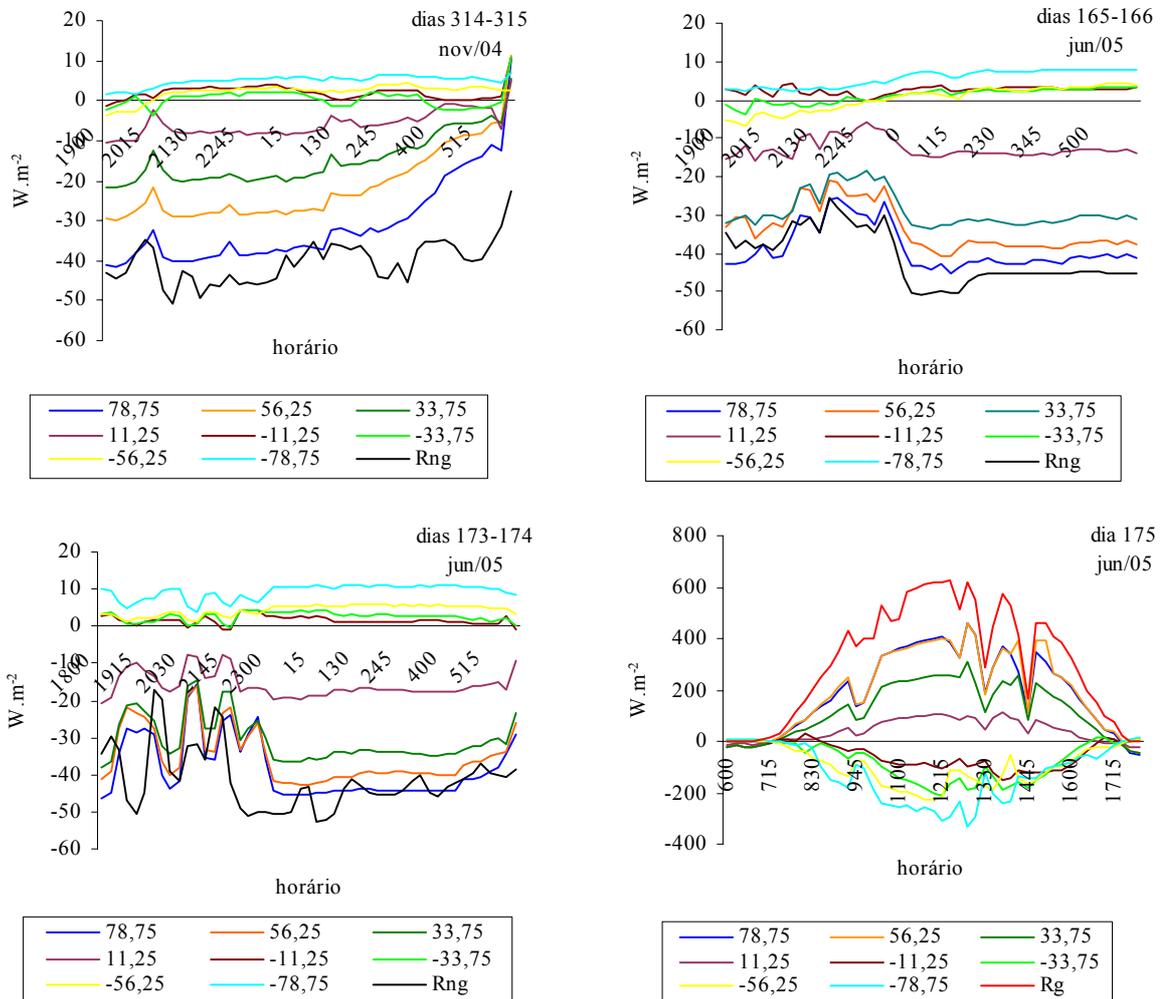


Figura 11 - Evolução temporal dos valores de saldo de radiação em cada latitude de medida, para a árvore de laranja, nos dias julianos 314-315 (AF de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$), dias 165-166 (AF de $18,2 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$) e dias 173-174 (AF de $12,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$), no período noturno, e dia 175 (AF zero), no período diurno

2.3.2 Variação temporal do saldo de radiação de um trecho de renque de cafeeiros nas diferentes posições de montagem

2.3.2.1 Cafezal formado

O sistema móvel de medida espaço-temporal do saldo de radiação foi anteriormente utilizado por Marin (2003), que previamente ao início de sua experimentação realizou uma série

de testes nos quais o conjunto de saldo-radiômetros não envolvia plantas no seu interior, de modo a se estabelecer a magnitude do “erro de compensação”. Aquele autor cita que para três dias de avaliação, o sistema apresentou um desvio do saldo de radiação nulo (teoricamente, uma compensação perfeita) de $0,2 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, representando apenas 4% da energia radiante total disponível na horizontal. Com base nesses resultados e na similaridade de procedimentos de montagem deste trabalho com o daquele autor, assume-se aqui que o erro de compensação era dessa ordem de grandeza e, portanto, bastante aceitável, não se realizando testes adicionais.

Realizaram-se medidas do saldo de radiação com os cafeeiros totalmente desfolhados, entre março e abril de 2004, por 11 dias. A Figura 12 apresenta as curvas de medida de cada saldo-radiômetro para os dias julianos 71 e 73, em que os saldos integrados de radiação do renque (Rnc), entre 06:00 e 18:00h foram de $0,57 \text{ MJ.m}^{-1}.\text{renque.12h}^{-1}$ e $0,37 \text{ MJ.m}^{-1}.\text{renque.12h}^{-1}$, respectivamente.

Realizaram-se posteriormente, em abril de 2004, outros 10 dias de medidas do saldo de radiação (Rnc) de outro trecho de renque do mesmo cafezal, com área foliar de $4,21 \text{ m}^2.\text{m}^{-1}.\text{renque}$, destacando-se os dias 110, com Rnc igual a $19,8 \text{ MJ.m}^{-1}.\text{renque.12h}^{-1}$, e 119 com Rnc de $18,8 \text{ MJ.m}^{-1}.\text{renque.12h}^{-1}$ (Figura 12).

Devido a orientação noroeste-sudeste dos renques, com azimute de 19° a partir do sul, tem-se a lateral do renque voltada para leste recebendo maior insolação no período da manhã, verificada principalmente pelos altos valores de saldo de radiação para os sensores Rn5 e Rn6, e a lateral voltada para o oeste recebendo maior insolação no período da tarde, com altos valores de Rnc para os sensores Rn3 e Rn4.

Assim, os saldo-radiômetros posicionados nas mesmas latitudes de montagem, porém em lados opostos do arco metálico (Figura 5), como Rn4 e Rn5, apresentaram certa simetria temporal de medida, nesse caso com valores positivos, nos dias com pequena nebulosidade (Figura 12). Os saldo-radiômetros posicionados no hemisfério inferior do arco metálico (Rn1, Rn2, Rn7 e Rn8) também apresentam certa simetria temporal de medida, porém com valores negativos (Figura 12).

Conformação similar de curvas de medida do saldo de radiação foram determinadas por Marin (2003), utilizando-se do sistema móvel de medida do saldo de radiação no mesmo cafezal. Gutiérrez e Meinzer (1994) destacam para um cafezal de orientação oposta, leste-oeste, com espaçamento de 3,60 m entre linhas e 0,71 m entre plantas, com dois saldo-radiômetros

posicionados horizontalmente a 6,5 m acima do cafezal, curvas de medida do saldo de radiação muito similares às dos sensores Rn4 e Rn5 (Figura 12), com valores máximos entre 600 e 800 W.m^{-2} , para índices de área foliar entre 1,4 e 7,5.

As curvas de medida dos saldo-radiômetros Rn3, Rn4, Rn5 e Rn6, tanto para cafeeiros desfolhados (dias 71 e 73) quanto para cafeeiros enfolhados (dias 110 e 119) foram similares (Figura 12). Porém, as curvas de resposta dos sensores posicionados no hemisfério inferior (Rn1, Rn2, Rn7 e Rn8, dias 110 e 119) foram diferenciadas daquelas do renque desfolhado (dias 71 e 73) (Figura 12). Na presença de área foliar, parte da radiação foi refletida pela folhagem e o restante, em grande parte, absorvida. Apenas a radiação que penetrou pela porosidade do dossel ou foi transmitida através da folhagem atingiu esses sensores, gerando saídas de energia radiante. Assim, as curvas de resposta desses sensores para cafeeiros enfolhados, foram menos negativas ao longo do período diurno.

Ao contrário das medições realizadas no período diurno, com o sistema permanentemente em movimento, as medidas do saldo de radiação no período noturno foram realizadas com o equipamento estacionário. Assumiu-se essa postura de medida para o período noturno, após a análise das medidas realizadas entre os dias 119-120, com o sistema em funcionamento, e os dias 121-122, com o sistema estacionário, no trecho de renque de cafeeiros enfolhados (Figura 12). As curvas de resposta dos oito sensores foram muito similares entre as duas medidas, com valores de Rnc pontuais muito próximos, demonstrando que as medidas realizadas no período noturno poderiam ser quantificadas com o sistema parado, sem perda de precisão.

Nesse período, em que o balanço de radiação de ondas longas torna-se o único termo do balanço de energia radiante, têm-se respostas diferenciadas entre os saldo-radiômetros. Os sensores posicionados no hemisfério superior, Rn4 e Rn5, apresentam uma perda de energia radiante superior aos demais, durante todo o período. Destaca-se os primeiros horários em que a emissão dos cafeeiros foi superior devido a elevada temperatura da folhagem. Resposta similar foi também observada para Rn3 e Rn6. Os demais sensores, posicionados no hemisfério inferior do arco, mostram que a emissão dos cafeeiros foi anulada pela radiação emitida pelo solo e vegetação de cobertura, tornando o saldo de radiação pequeno, porém positivo, próximo a 10 W.m^{-2} durante a maior parte do período noturno (Figura 12).

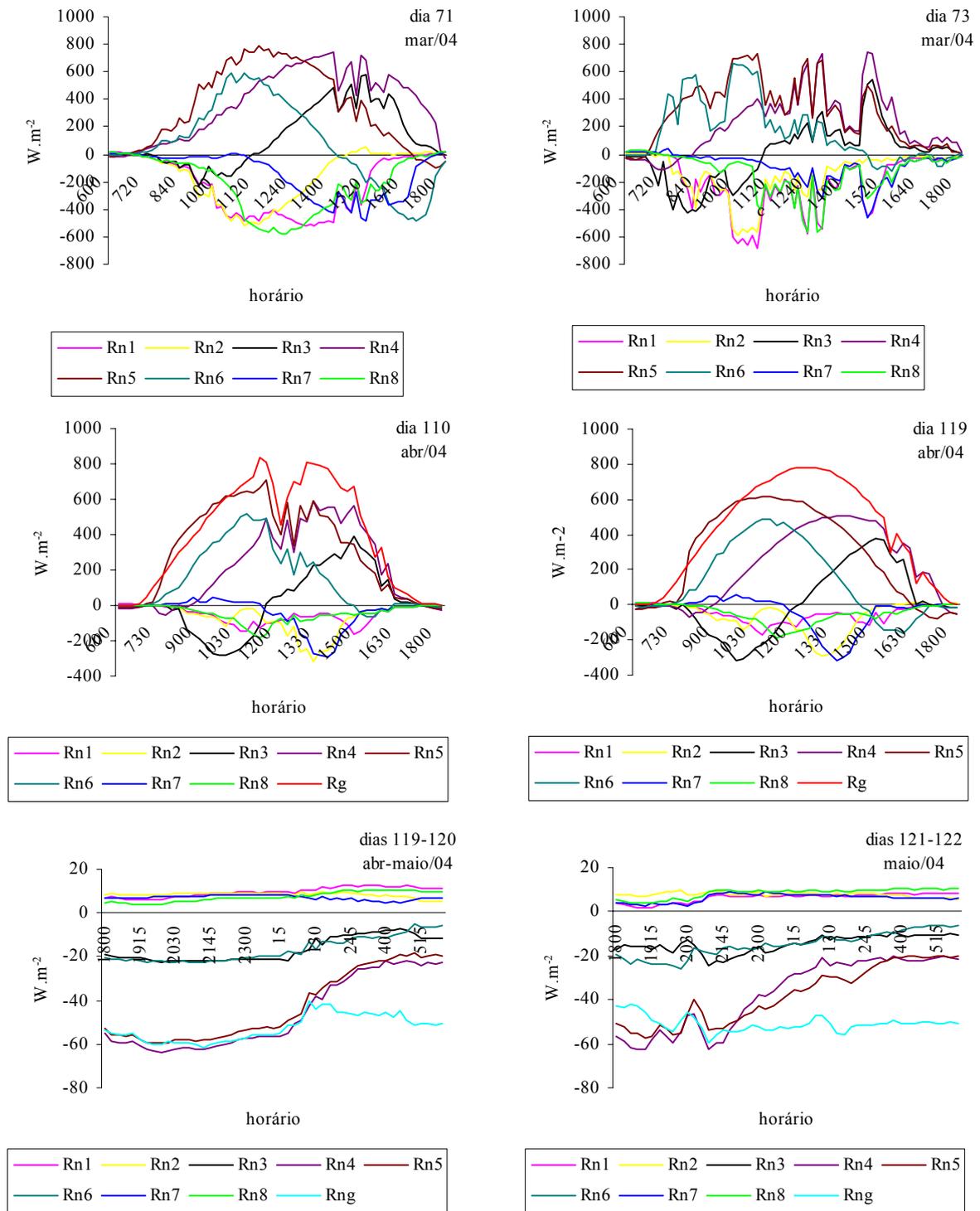


Figura 12 - Evolução temporal dos valores do saldo de radiação em cada posição de medida, em um trecho de renque de cafeeiros formados, nos dias julianos 71 e 73 (AF zero) e dias 110 e 119 (AF de 4,21 m².m⁻¹renque) no período diurno, e dias 119-120 e 120-121 (AF de 4,21 m².m⁻¹renque) no período noturno

Os sensores Rn4 e Rn5 demonstram que a perda em energia radiante dos cafeeiros para essas latitudes de medidas foi similar ao saldo de radiação de gramado (Rng), principalmente nos primeiros horários do período noturno. Nos períodos seguintes, a diminuição da temperatura do dossel reduz a emissão dos cafeeiros. Essa redução, associada ao recebimento de energia radiante vinda da superfície (solo) do cafezal, tornou os valores de Rnc dos sensores Rn4 e Rn5 menos negativos que o saldo de radiação de gramado (Figura 12).

2.3.2.2 Cafezal em formação

As primeiras medidas, num total de seis dias, foram realizadas em agosto de 2004, com área foliar de $3,64 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$. Em setembro do mesmo ano foram realizadas medições em mais sete dias e, pela ocorrência de doenças foliares e colheita manual, a área foliar do trecho de renque estava reduzida a $1,42 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$.

Após a execução de um tratamento fitossanitário e nutricional adequado para a cultura, os cafeeiros apresentaram um alto incremento em área foliar. Em fevereiro de 2005, na retomada das medições, a área foliar do trecho de renque era de $12,61 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$. Objetivando avaliar o efeito da densidade de área foliar na formação do saldo de radiação do renque, realizaram-se sucessivas desfolhas, gerando as áreas foliares de $10,63 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$, $8,72 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$, $6,63 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$, $4,68 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$ e $0 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$, totalizando mais 65 dias de medidas, finalizadas em maio de 2005.

Tendo a mesma orientação de renques do cafezal formado, as curvas de resposta dos oito saldo-radiômetros, exemplificadas na Figura 13 pelos dias julianos 260 (AF de $1,42 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$), 37 (AF de $12,61 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$), 101 (AF de $8,72 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$) e 121 (AF de $4,68 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$), apresentaram padrões de variação similares aos observados anteriormente para cafezal formado. Os saldos integrados de radiação desses quatro dias, entre 6:00 e 18:00h, foram de $3,17 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-1} \text{renque} \cdot 12\text{h}^{-1}$, $25,6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-1} \text{renque} \cdot 12\text{h}^{-1}$, $18,0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-1} \text{renque} \cdot 12\text{h}^{-1}$ e $7,3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-1} \text{renque} \cdot 12\text{h}^{-1}$, respectivamente (Figura 13).

Comparando-se o saldo de radiação médio dos sensores Rn1 e Rn8 (Figura 5) à irradiância solar global (Rg), entre 6:00 e 18:00h, obtêm-se uma perda de energia radiante

diretamente proporcional a redução da área foliar, registrando-se valores de Rnc integrados no período de $-0,65.R_g$ (dia 260), $-0,19.R_g$ (dia 37), $-0,30.R_g$ (dia 101) e $-0,35.R_g$ (dia 121) (Figura 13).

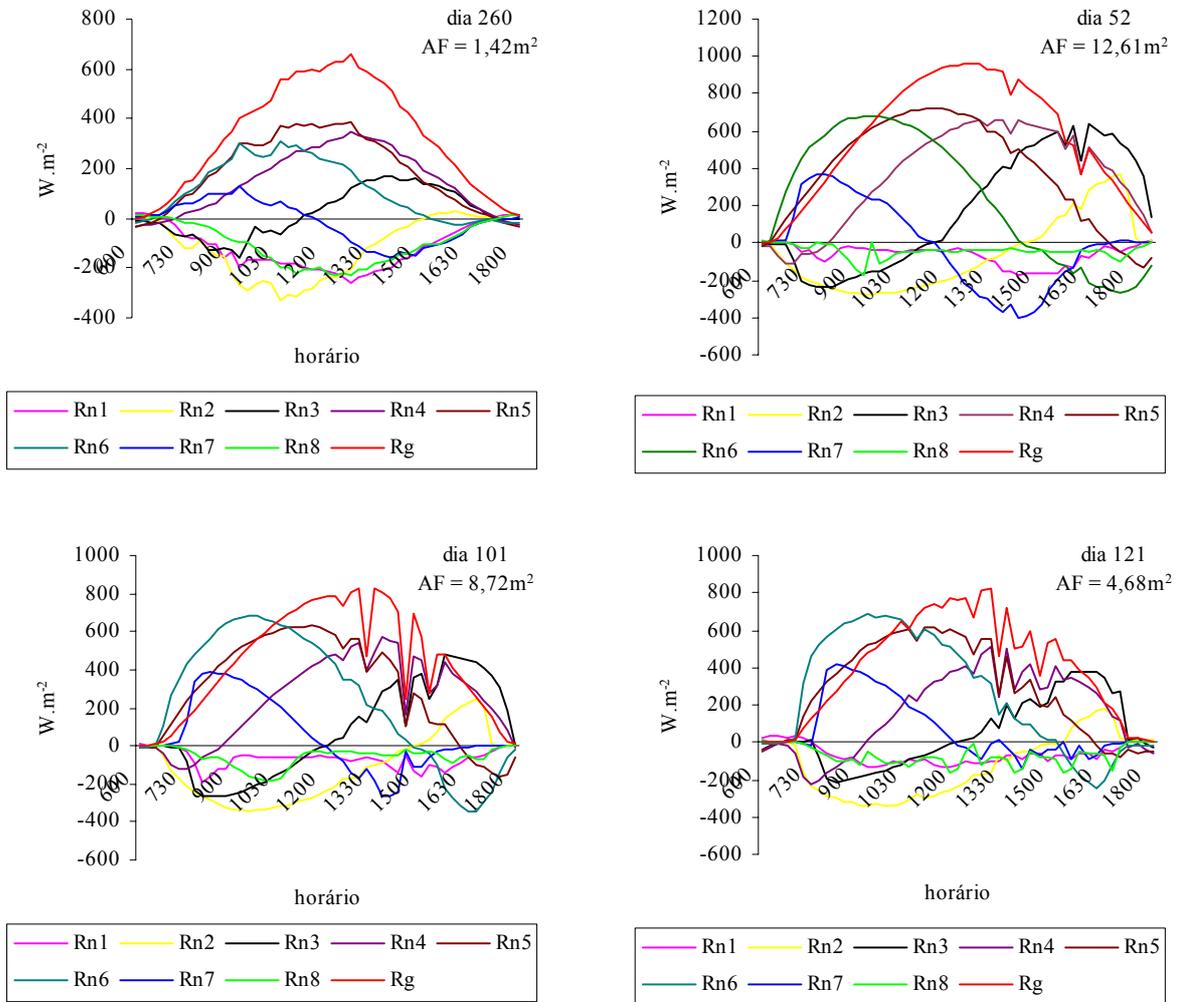


Figura 13 - Evolução horária das medidas dos oito saldo-radiômetros, em renque de cafeeiros em formação, nos dias julianos 260, 33, 97 e 119, no período diurno. AF significa área foliar num trecho de 1m de renque

As curvas de medida dos oito saldo-radiômetros para o dia 124 (Figura 14), após desfolhamento total, demonstram que devido a reduzida área de interceptação de radiação dos ramos dos cafeeiros em formação, o saldo de radiação foi de $0,99 \text{ MJ.m}^{-1}\text{renque.12h}^{-1}$. Fazendo-se uma relação ao saldo de radiação obtido para a área foliar de $12,61 \text{ m}^2.\text{m}^{-1}\text{renque}$ (Figura 13), apesar das diferenças entre valores de irradiância solar global dos dois dias, o saldo de radiação

dos ramos corresponderia a menos de 4% do saldo de radiação do renque, similar ao descrito por Palmer (1977) para uma árvore de macieira completamente enfolhada.

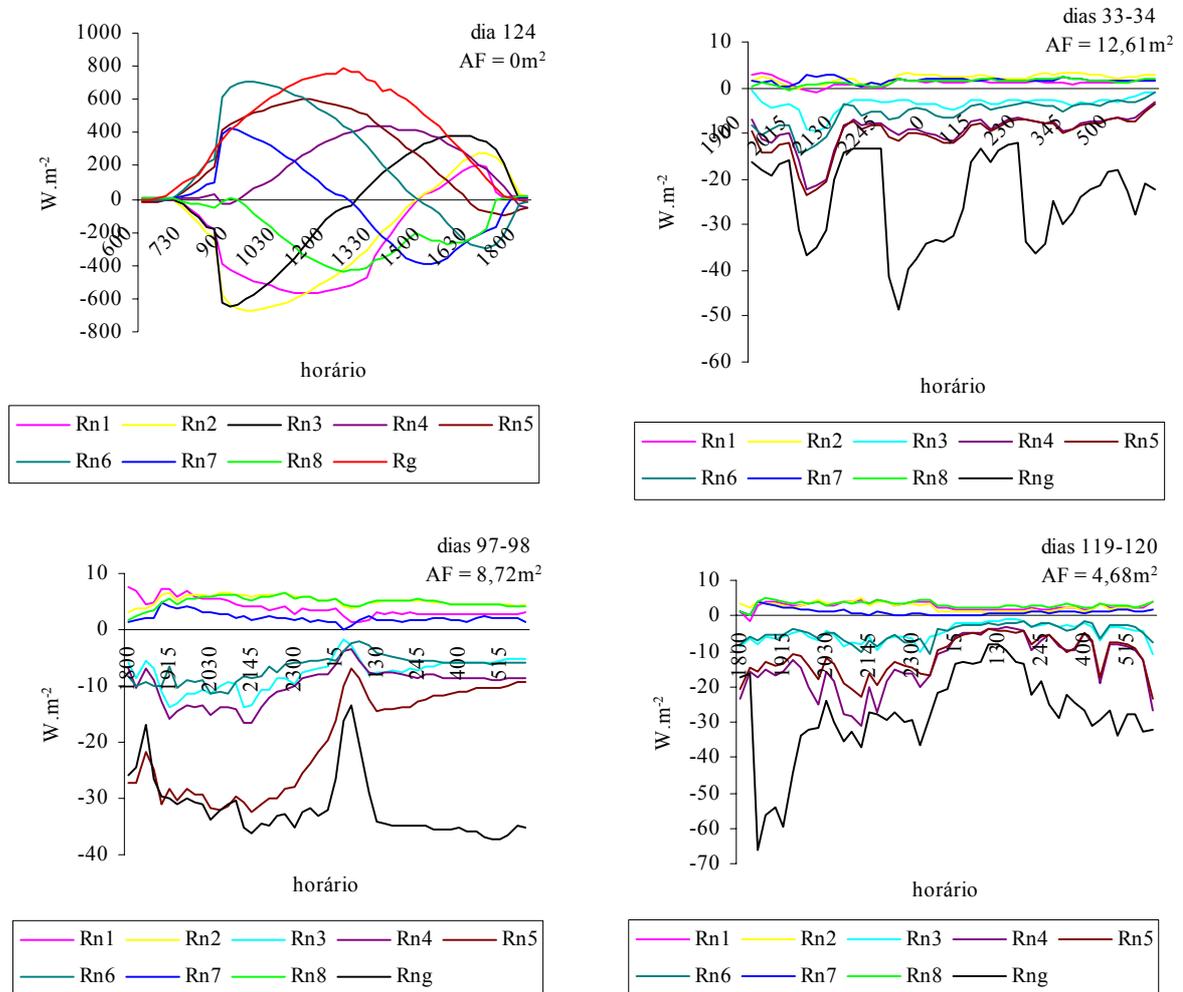


Figura 14 - Evolução horária das medidas dos oito saldo-radiômetros, em renque de cafeeiros em formação, nos dias julianos 124 no período diurno, e dias 33-34, 97-98 e 119-120, no período noturno. AF significa área foliar num trecho de 1m de renque

No período noturno, as curvas de medida do saldo de radiação dos cafeeiros em formação foram semelhantes às observadas em cafezal formado (Figura 12), com os quatro sensores da porção superior de medida apresentando valores negativos, porém maiores que o saldo de radiação de gramado, resultado da diferença entre a geometria dos cafeeiros (paralelepípedo) e do gramado (plana), interferindo diretamente no balanço de radiação. Destaca-se uma diferença de saldo de radiação entre os sensores Rn4 e Rn5, dias 97-98, com Rn4 assinalando uma menor perda de energia radiante em comparação a Rn5. Essa pequena diferença de medida do saldo de

radiação entre os dois sensores, pode estar associada ao local de medida no renque. Como as medidas no período noturno foram efetuadas com o equipamento parado, é possível que as medidas tenham sido realizadas em um trecho do renque com maior concentração de área foliar próxima ao sensor Rn5, em comparação ao local de medida de Rn4, provocando diferenças nos resultados (Figura 14).

2.3.3 Relações do saldo de radiação da copa da laranjeira com a irradiância solar global e o saldo de radiação de gramado.

As correlações do saldo de radiação da copa da laranjeira (R_{nl}), com área foliar de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$, entre outubro e dezembro de 2004, com irradiância solar global (R_g) e o saldo de radiação de gramado (R_{ng}) apresentaram bons ajustes das equações de regressão, gerando equações polinomiais de 2º grau (Figura 15). Bons ajustes entre R_{nl} e R_g foram obtidos por Angelocci et al. (2004), para o saldo de radiação da copa de uma árvore de lima ácida “Tahiti” e a irradiância solar global, obtendo-se os melhores ajustes por curvas sigmóides.

Valores máximos de R_{nl} , ao redor de $7,5 \text{ MJ} \cdot \text{árvore}^{-1} \cdot 15\text{min}^{-1}$, são de mesma magnitude aos obtidos pelos autores anteriormente citados, superiores a $8,5 \text{ MJ} \cdot \text{árvore}^{-1} \cdot 15\text{min}^{-1}$ para árvores de lima ácida “Tahiti”. Da mesma forma observada por Angelocci et al. (2004), também se evidencia saldo de radiação das árvores negativo sob baixos valores de R_g (Figura 15_a).

Verifica-se na Figura 15_b, que o saldo de radiação da laranjeira foi positivo em momentos de R_{ng} negativo, pois a superfície curvilínea da copa das árvores, e o arranjo dessas no pomar, com trocas energéticas entre elementos (plantas), fazem com que a perda de energia radiante seja inferior à registrada para superfícies gramadas (planas) nos períodos de reduzida incidência de radiação solar, como ao amanhecer, ao entardecer e, principalmente, no período noturno (Figura 11), pois as trocas no gramado são realizadas diretamente entre ele e a atmosfera.

O saldo médio de radiação da laranjeira por unidade de área projetada da copa (R_{nl}/AP), na escala horária, correspondeu à irradiância solar global interceptada por $0,91 \text{ m}^2$ de superfície horizontal e ao saldo de radiação de $1,46 \text{ m}^2$ de superfície gramada (Figura 15_c). A relação entre

Rnl/AP e Rg é muito próxima da encontrada por Angelocci et al. (2004) para lima ácida “Tahiti”, de aproximadamente $0,88.R_g$.

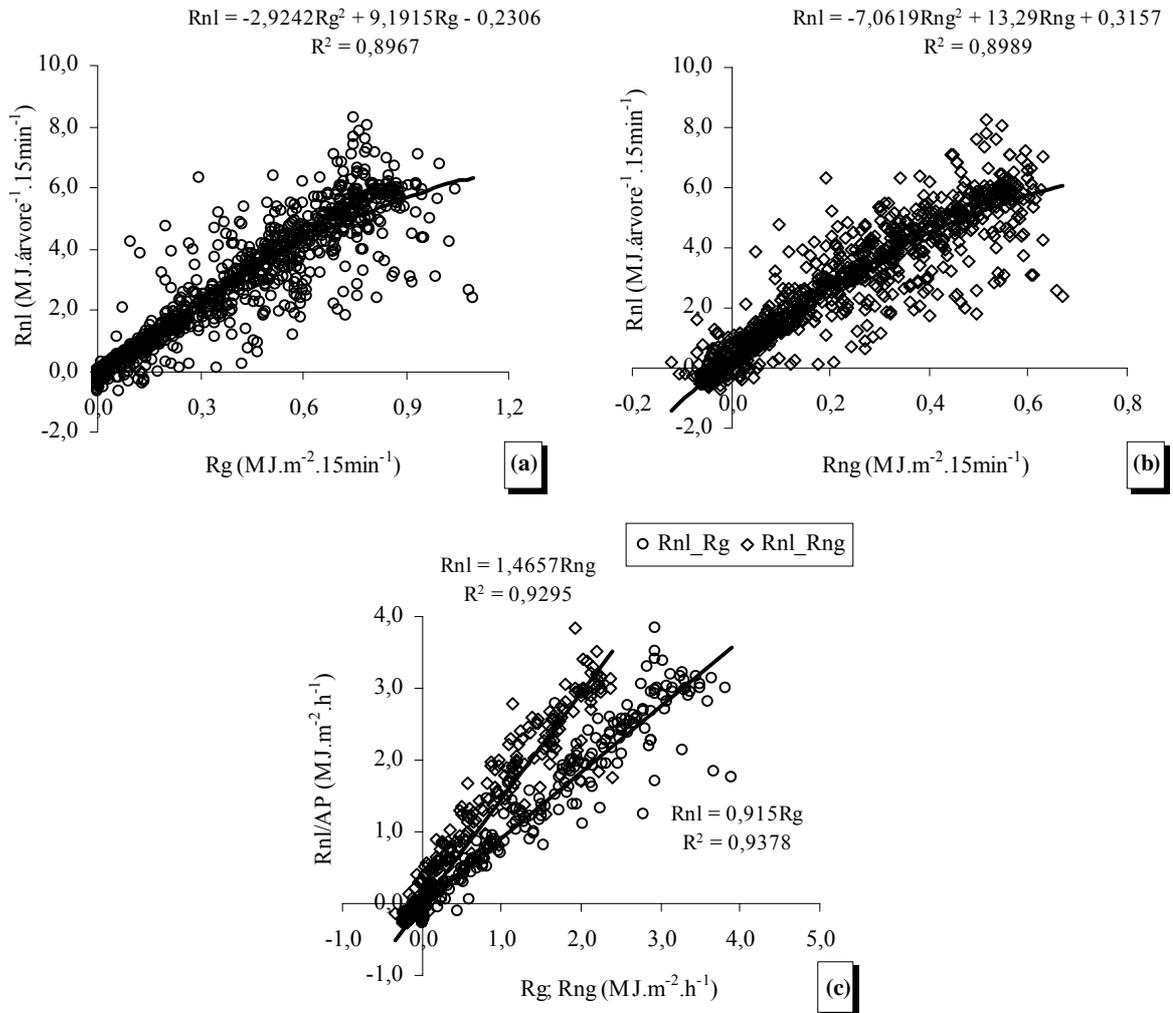


Figura 15 - Correlações do saldo de radiação da copa da laranjeira (Rnl) com a irradiância solar global (Rg) e com o saldo de radiação de gramado (Rng), para área foliar (AF) de $37,0 \text{ m}^2.\text{árvore}^{-1}$, na escala de 15 minutos (a; b), e correlação do saldo de radiação da árvore de laranjeira por unidade de área projetada da copa (Rnl/AP) com Rg e Rng na escala horária (c). Período out-dez/2004

A Figura 16 apresenta as correlações entre o saldo de radiação da árvore de laranjeira (Rnl) e a irradiância solar global (Rg), medidos entre maio e junho de 2005, para as AF de $37,0 \text{ m}^2.\text{árvore}^{-1}$, $27,3 \text{ m}^2.\text{árvore}^{-1}$, $18,2 \text{ m}^2.\text{árvore}^{-1}$ e $12,0 \text{ m}^2.\text{árvore}^{-1}$, na escala de 15 minutos. Os valores de Rg foram aquém dos registrados anteriormente, na primavera de 2004 (Figura 15).

Em resposta, foram encontradas correlações específicas entre o saldo de radiação da laranjeira e a irradiância solar global, para a AF de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$, para cada estação (Figuras 15_a e 16_a).

As variações na densidade de folhagem da copa afetaram diretamente o saldo de radiação da árvore de laranjeira, observando-se a redução dos valores máximos de Rnl em função da redução da área foliar (Figura 16).

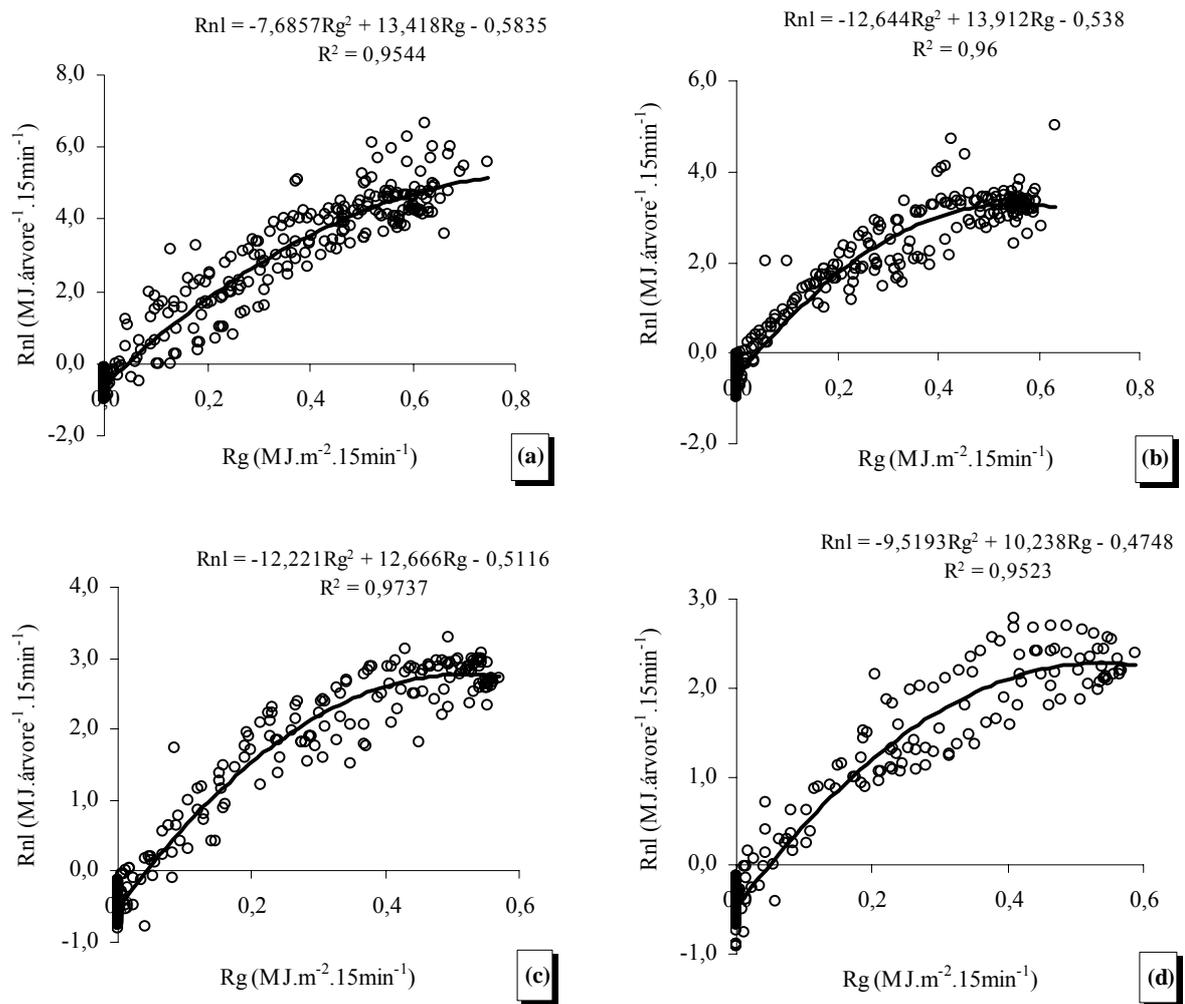


Figura 16 - Correlações entre o saldo de radiação da árvore de laranjeira (R_{nl}) e a irradiância solar global (R_g), para as áreas foliares de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (a), $27,3 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (b), $18,2 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (c) e $12,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (d), na escala de 15 minutos. Período maio-jun./2005

Em função da redução da densidade de fluxo de radiação, os valores máximos do saldo de radiação de gramado foram aproximadamente 50% inferiores aos medidos na primavera de 2004 (Figuras 15 e 17). Essa diferença, no entanto, não foi proporcional a alteração dos valores de

densidade de fluxo de radiação solar entre as duas estações, primavera de 2004 e outono de 2005 (Figuras 15 e 16), concordando com descrição de variações sazonais entre a irradiância solar global e o saldo de radiação (SENTELHAS; NASCIMENTO, 2003). Essa grande redução dos valores de Rng, também gerou correlações específicas entre Rnl e Rng, para a AF de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$, para cada uma das estações (Figuras 15_b e 17_a). Essas variações sazonais entre o saldo de radiação da laranjeira e o saldo de radiação de gramado, estão de acordo com o observado por Angelocci et al. (1999) para lima ácida “Tahiti”.

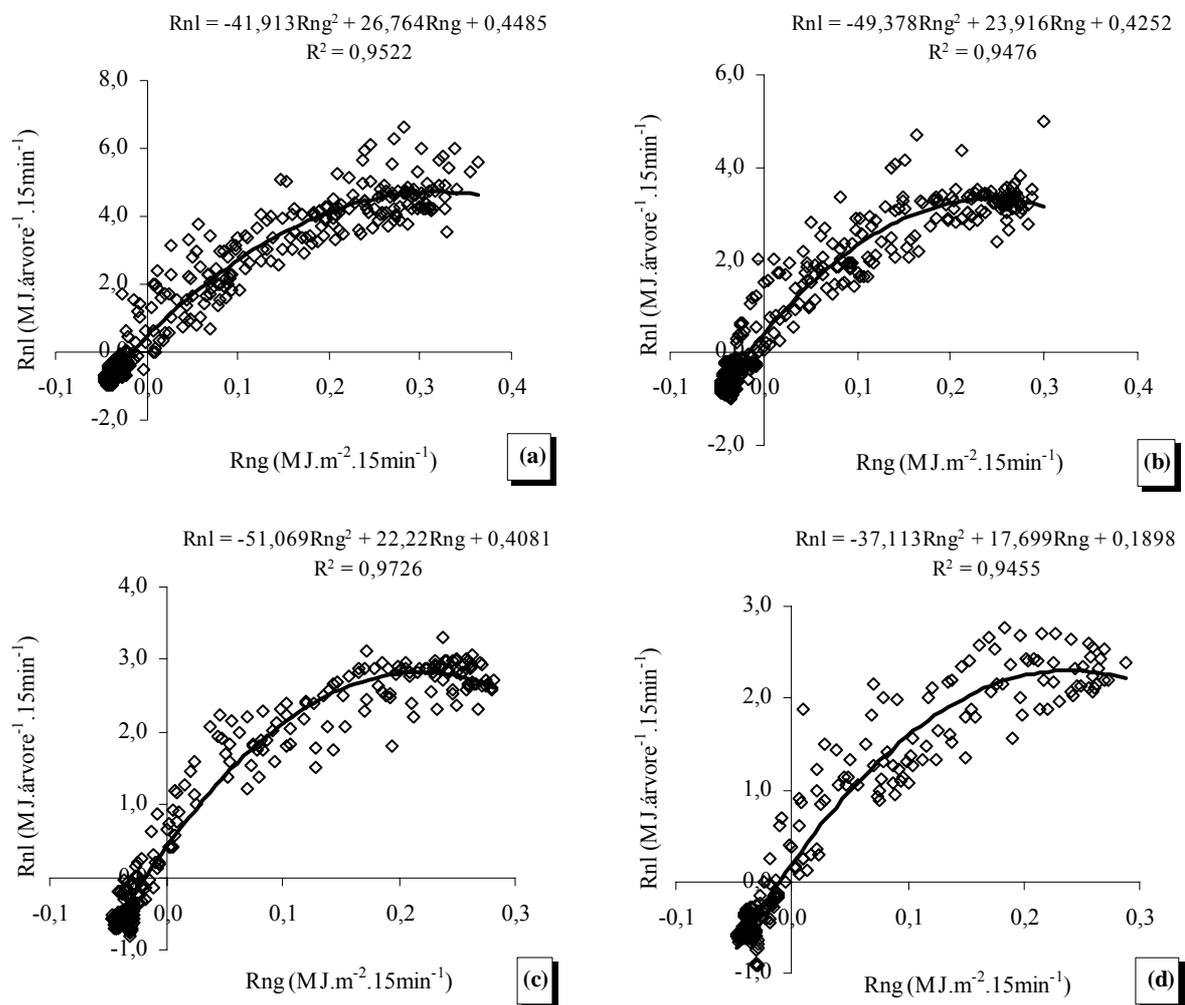


Figura 17 - Correlações do saldo de radiação integrado da copa da laranjeira (R_{nl}) com o saldo de radiação de gramado (R_{ng}), para as áreas foliares de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (a), $27,3 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (b), $18,2 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (c) e $12,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (d), na escala de 15 minutos. Período: maio-jun./2005

Na Figura 18 tem-se o saldo de radiação da árvore de laranjeira (R_{nl}) correlacionado à irradiância solar global (R_g) e ao saldo de radiação de gramado (R_{ng}), para intervalos horários.

Devido a geometria da copa da laranjeira (aproximadamente esférica), a interceptação de radiação solar torna-se menos variável em função da declinação solar, em comparação à interceptação por uma superfície gramada. Assim, ao correlacionar-se o saldo de radiação da laranjeira à irradiância solar global, na primavera de 2004 (Figura 15_c) e outono de 2005 (Figura 18_a), com a mesma área foliar, verifica-se uma diferença de apenas 18,2% entre as correlações (valores do coeficiente angular) geradas.

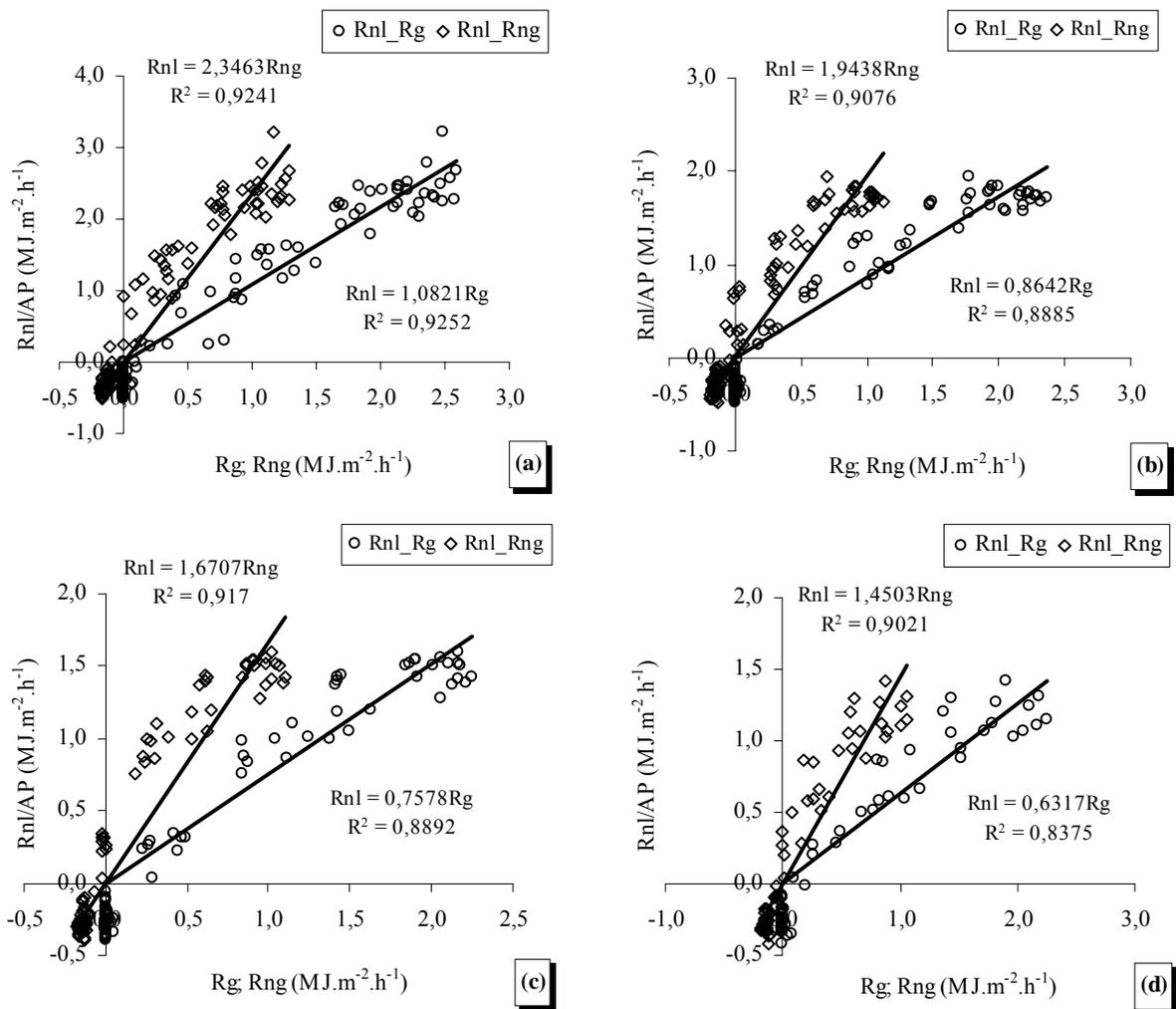


Figura 18 - Correlações do saldo de radiação integrado da copa da laranjeira por unidade de área projetada da copa (Rnl/AP) com a irradiância solar global (Rg) e com o saldo de radiação de gramado (Rng), para as áreas foliares de 37,0 m².árvore⁻¹ (a), 27,3 m².árvore⁻¹ (b), 18,2 m².árvore⁻¹ (c) e 12,0 m².árvore⁻¹ (d), na escala horária. Período maio-jun./2005

Entretanto, ao correlacionar-se o saldo de radiação da laranjeira para uma mesma área foliar ao saldo de radiação de gramado, medidos na primavera de 2004 (Figura 15_c), e outono

de 2005 (Figura 18_a), tem-se uma diferença de 60,0% entre as correlações obtidas, em função do descrito anteriormente.

Comparando-se a correlação entre o saldo de radiação da laranjeira por unidade de área projetada da copa com AF de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ e a irradiância solar global, às demais situações de área foliar, verifica-se que as reduções das correlações (coeficientes angulares) são inferiores as variações da área foliar, evidenciando o auto-sombreamento das folhas da árvore de laranjeira (Figura 18).

A Figura 19 (a) apresenta a correlação entre os valores diários do saldo de radiação da laranjeira por unidade de área foliar (R_{nl}/AF) e a irradiância solar global, para todas as áreas foliares. A maior amplitude de R_{nl}/AF foi verificada para a AF de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$, em 2004, de $1,07 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ a $4,59 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. As medidas realizadas em 2005 apresentaram menor amplitude de R_{nl}/AF , com valor mínimo de $2,10 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, e máximo de $3,39 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. Os valores de R_{nl}/AF são de magnitude similar aos obtidos por Angelocci et al. (2004) para duas árvores de lima ácida “Tahiti” com AF de $51,2 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ e $39,9 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$, de $2,0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ a $6,02 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$.

A correlação entre R_{nl}/AF e R_g , na escala diária, apresentou bom nível de ajuste da equação de regressão, verificando-se principalmente para a AF de $37 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$, que as relações apresentaram praticamente um ajuste único, independentemente da estação do ano (Figura 19_a).

Realizando-se a correlação entre R_{nl} expresso por unidade de área projetada da copa no solo (R_{nl}/AP) com R_g , assim como testado por Angelocci et al. (2004), também se obteve bom ajuste da análise de regressão para todas as AF (Figura 19_b). Os autores citados verificaram melhor ajuste entre as variáveis, para duas árvores de lima ácida “Tahiti” com áreas foliares distintas, destacando-se também que a árvore de laranjeira apresentou menor absorção de energia radiante por unidade de área projetada de copa em comparação às árvores de lima ácida “Tahiti”.

As relações verificadas demonstram a possibilidade de encontrar-se uma função de transferência entre R_{nl} e R_g , com razoável precisão, a partir de medidas da irradiância solar global, área foliar ou área de projeção da copa. Entretanto, uma função desse tipo é válida apenas para árvores de geometria, área foliar, e geometria de plantio similares aos verificados neste estudo.

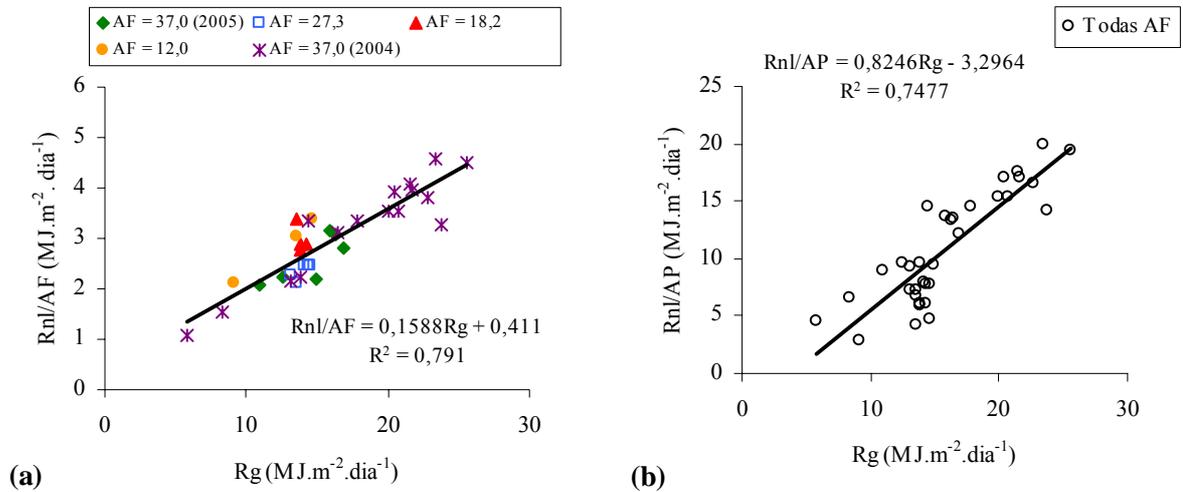


Figura 19 - Correlações entre o saldo de radiação da copa da laranjeira por unidade de área foliar (R_{nl}/AF) e a irradiância solar global (R_g), para todas as áreas foliares (a), saldo de radiação da copa da laranjeira por unidade de área projetada da copa (R_{nl}/AP) com a irradiância solar global (R_g), para todas áreas foliares (b), na escala diária

Na Figura 20 (a) tem-se as correlações entre R_{nl}/AF e R_{ng} para todas as área foliares. Diferentemente ao observado entre R_{nl}/AF e R_g (Figura 19_a), observa-se ainda a interferência da variação sazonal da relação R_g/R_{ng} (SENTELHAS; NASCIMENTO, 2003), gerando uma correlação com coeficiente de determinação inferior ao obtido para a relação entre R_{nl} e R_g , principalmente pelo desvio das relações entre R_{nl}/AF e R_{ng} das áreas foliares de $18,2 m^2.árvore^{-1}$ e $12,0 m^2.árvore^{-1}$, em relação as demais, na escala diária. Essa observação reforça a inferência feita por Pereira et al. (2001), da dificuldade em encontrar uma função única de transferência para estimar R_{nl} através de medidas do saldo de radiação de gramado.

Ao correlacionar-se o saldo de radiação da laranjeira por unidade de área projetada da copa (R_{nl}/AP) com R_{ng} , obteve-se melhor um melhor ajuste da análise de regressão, pois dessa forma acaba-se excluindo o efeito de auto-sombreamento de folhas (Figura 20_b).

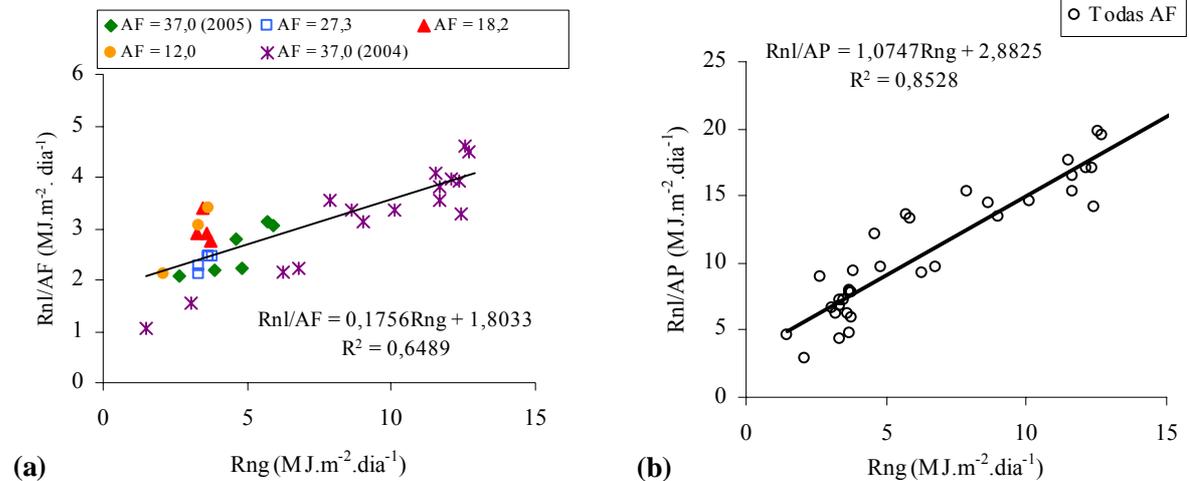


Figura 20 - Correlações entre o saldo de radiação da copa da laranjeira por unidade de área foliar (Rnl/AF) e o saldo de radiação de gramado (Rng) para todas as AF (a), e correlação entre o saldo de radiação da laranjeira por unidade de área de projeção da copa (Rnl/AP) com o saldo de radiação de gramado (Rng) para todas as áreas foliares (b), na escala diária

2.3.4 Relação do saldo de radiação de renque do cafezal com irradiância solar global e saldo de radiação de gramado

2.3.4.1 Cafezal formado

As medidas de Rnc realizadas em cafezal formado, com área foliar (AF) média de $4,21 m^2.m^{-1}$ renque, apresentaram resposta não linear em relação à irradiância solar global (Rg) e o saldo de radiação de gramado (Rng), sendo melhores ajustes das curvas obtidos com equações polinomiais de 2º grau, na escala de 15 minutos (Figura 21). Marin (2003) também observou não linearidade nas correlações do saldo de radiação de um trecho de renque de cafeeiros com irradiância solar global e o saldo de radiação de gramado.

A energia radiante absorvida pelo trecho de renque amostrado foi de até $0,95 MJ.m^{-1}renque.15min^{-1}$ para momentos de elevada irradiância solar global. Valores superiores, ao redor de $1,25 MJ.m^{-1}renque.15min^{-1}$, foram verificados por Marin (2003), realizando medidas no mesmo cafezal, porém com área foliar superior. Assim como verificado entre as correlações de Rnc com Rg pelo referido autor, evidenciam-se valores negativos de Rnc

sob baixos valores de R_g , situações de nascer e pôr-do-sol, momentos em que o balanço de radiação de onda longa é predominante e as perdas energéticas do dossel são superiores aos ganhos (Figura 21_a).

Contrariamente, obtiveram-se valores positivos de R_{nc} em momentos de R_{ng} negativos. A geometria dos renques (paralelepípedo) permite uma interação entre plantas e superfície, resultando nesses momentos em um balanço de radiação mais positivo quando comparado com o saldo de radiação de uma superfície gramada, cuja geometria plana permite maiores perdas radiantes para a atmosfera acima (Figura 21_b).

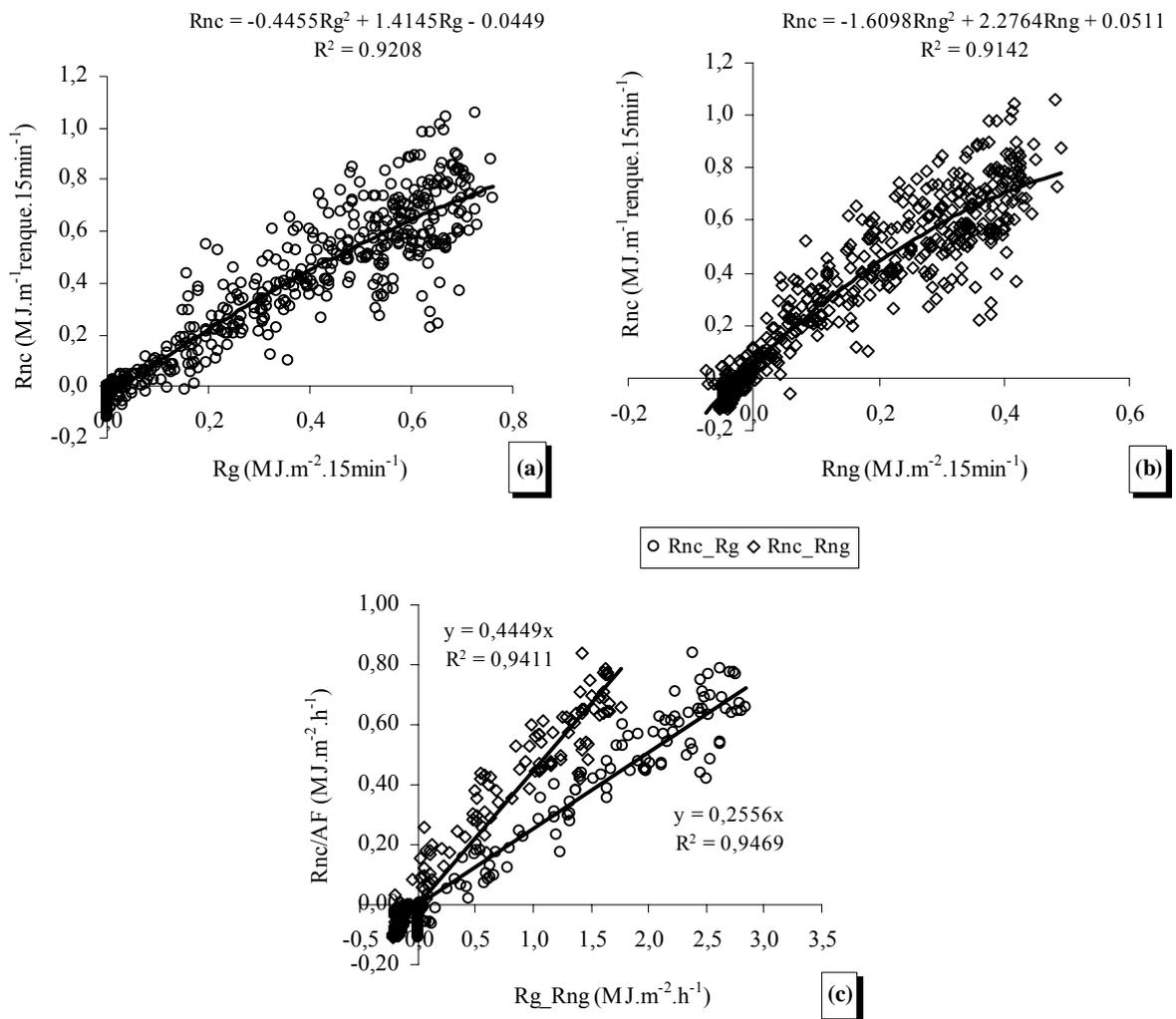


Figura 21 - Correlações do saldo de radiação por metro de comprimento de renque (R_{nc}), com irradiância solar global (R_g) e com saldo de radiação de gramado (R_{ng}) (a;b), na escala de 15 minutos, e correlações do saldo de radiação de cafeeiros formados por unidade de área foliar (R_{nc}/AF) com R_g e R_{ng} (c), na escala horária. Área foliar de 4,21 m².m⁻¹renque

Na Figura 21 (c) tem-se o saldo de radiação do renque de cafeeiros por unidade de área foliar (R_{nc}/AF) na escala horária, correlacionado a R_g e R_{ng} . Bons ajustes lineares foram obtidos pelas análises de regressão. Verifica-se que a absorção de energia radiante por unidade de área foliar dos cafeeiros (R_{nc}/AF) correspondeu à irradiância solar global interceptada por $0,25 \text{ m}^2$ de superfície horizontal, equivalendo ainda ao saldo de radiação de $0,45 \text{ m}^2$ de superfície gramada. Relações inferiores, com R_{nc}/AF igual a $0,145.R_g$ e $0,221.R_{ng}$ foram obtidas por Marin (2003), para o mesmo cafezal, na ocasião com AF média de $10 \text{ m}^2.\text{m}^{-1}$ renque. A condição de área foliar no presente estudo, aproximadamente 42% em relação ao trabalho do citado autor, reduziu o auto-sombreamento das folhas, permitindo uma maior transmissividade da radiação através do renque, atingindo camadas mais inferiores do dossel, proporcionando maior absorção por unidade de área foliar.

Na Figura 22 tem-se as correlações entre o saldo de radiação do renque por unidade de área foliar (R_{nc}/AF) com irradiância solar global (R_g) e o saldo de radiação de gramado (R_{ng}), na escala diária. Angelocci et al. (2003), cita relações muito próximas as encontradas, de aproximadamente $R_{nc}/AF = 0,10.R_g$ e $R_{nc}/AF = 0,33.R_{ng}$, também para um cafezal formado. Das equações de regressão geradas, obteve-se coeficiente de determinação para a relação R_{nc}/AF e R_g extremamente baixo, devido à pequena amplitude dos valores de R_{nc}/AF , porém com desvio padrão inferior a 10%. O desvio padrão para a relação R_{nc}/AF e R_{ng} foi ainda menor, de apenas 7%.

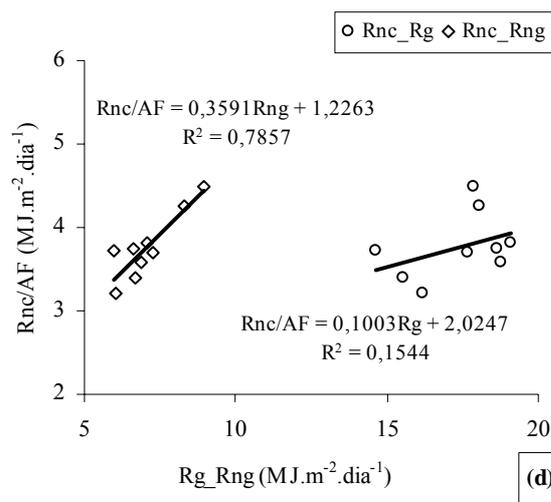


Figura 22 - Correlações do saldo de radiação do renque de cafezal formado por unidade de área foliar (R_{nc}/AF), para área foliar (AF) de $4,21 \text{ m}^2.\text{m}^{-1}$ renque, com a irradiância solar global (R_g) e o saldo de radiação de gramado (R_{ng}), na escala diária

2.3.4.2 Cafezal em formação

Assim como obtido para o cafezal formado (Figura 21) e também por Marin (2003), o saldo de radiação do renque de cafeeiros em formação apresentou boa correlação com a irradiância solar global e o saldo de radiação de gramado (Figura 23).

Verifica-se uma resposta diferenciada de R_{nc} para essa situação (Figura 23), em relação às medidas realizadas em cafezal formado (Figura 21). Divide-se claramente a dispersão dos pontos em duas porções, uma praticamente linear e inferior (manhã), e outra superior (tarde), formando uma hipérbole. A reduzida área foliar, de apenas $3,64 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ renque, concentrava-se em duas camadas, junto a base e no extrato superior do renque, pois os ramos intermediários possuíam alta carga de frutos. A medida que a altura do sol aumentou ao longo do dia, R_{nc} aumentou linearmente. Entre 12:00 e 13:30 h, a interceptação da radiação era realizada, em grande parte, pela face superior do renque, reduzindo-se assim a área total de interceptação, e consequentemente os valores de R_{nc} . A partir das 13:30 h, a face lateral oeste do renque interceptava radiação solar direta juntamente com a face superior, aumentando a área total de interceptação, e elevando novamente os valores de R_{nc} (Figura 24). Possivelmente, com o aumento da temperatura das adjacências, principalmente do solo, maior quantidade de radiação foi emitida em direção ao renque, tornando assim o saldo de radiação no período da tarde mais positivo que o verificado no período da manhã (Figuras 23_a;b).

Apesar dos cafeeiros em formação apresentarem apenas 13% menos área foliar que os cafeeiros formados, os valores de R_{nc} foram bem inferiores, não superando a $0,23 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{renque} \cdot 15 \text{ min}^{-1}$. Atribui-se os baixos valores de R_{nc} aos valores de R_g inferiores aos verificados na ocasião das medidas em cafezal formado, e principalmente as características do cafezal em formação, com renques de dimensões reduzidas, com aumento de densidade de folhagem, tornando maior o auto-sombreamento de folhas, e o amplo espaço vazio entre eles, provocando uma maior perda de energia radiante pela baixa interação ocorrida entre renques (Figura 23).

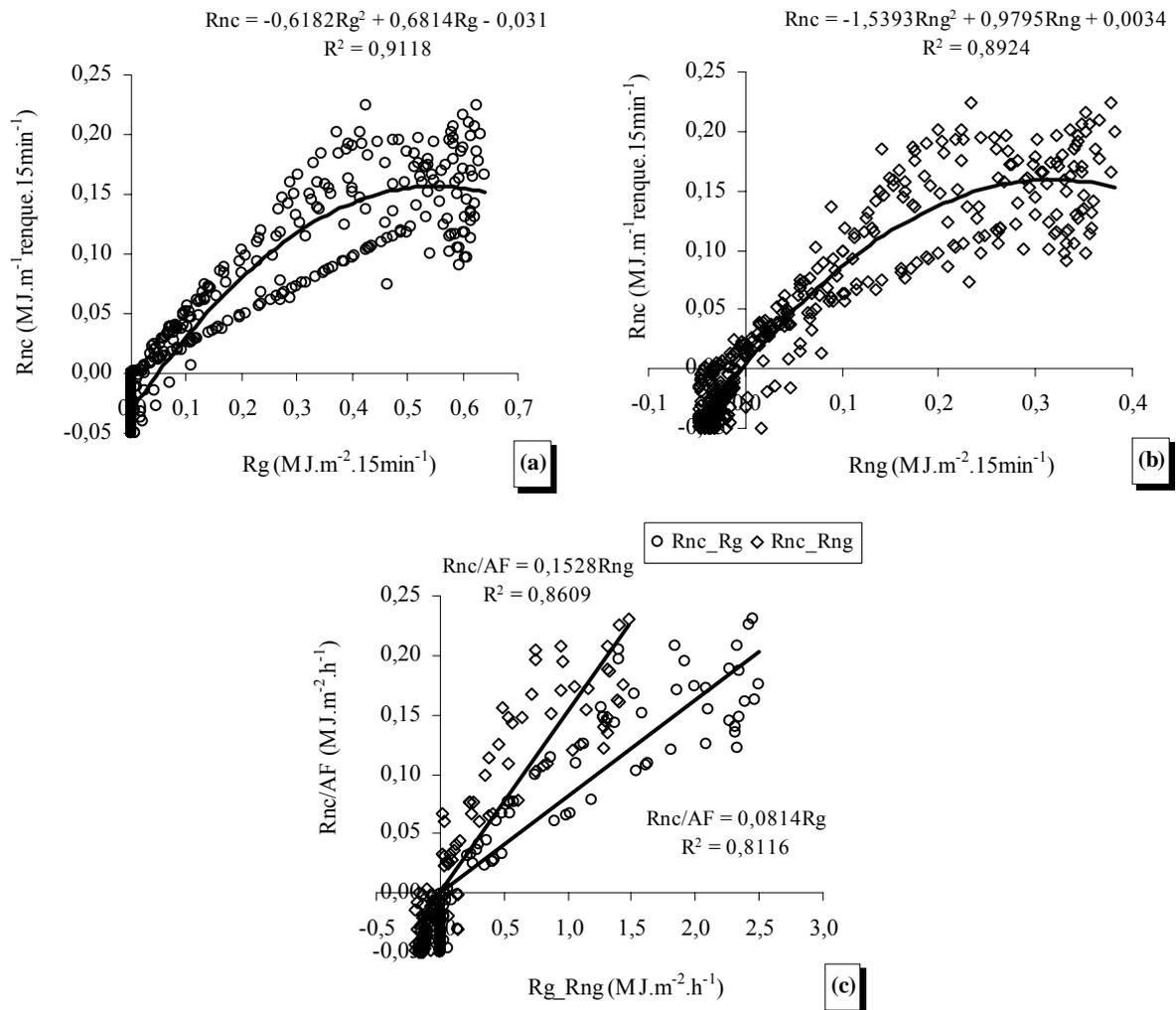


Figura 23 - Correlações do saldo de radiação do renque de caféiros em formação (Rnc) com a irradiância solar global (Rg) e com o saldo de radiação de gramado (Rng) (a;b), na escala de 15 minutos, e as correlações entre o saldo de radiação do renque de caféiros em formação por unidade de área foliar (Rnc/AF) com Rg e Rng (c), na escala horária. Área foliar de 3,64 m².m⁻¹renque

A Figura 23 (c) aponta os baixos valores do saldo de radiação do renque por unidade de área foliar (Rnc/AF), com valores máximos de 0,22 MJ.m⁻².h⁻¹, enquanto que para o cafezal formado, Rnc/AF atingiu valores até mesmo superiores a 0,8 MJ.m⁻².h⁻¹ (Figura 21). Com isso, as correlações de Rnc/AF com Rg e Rng foram 65% inferiores àquelas obtidas para o cafezal formado.

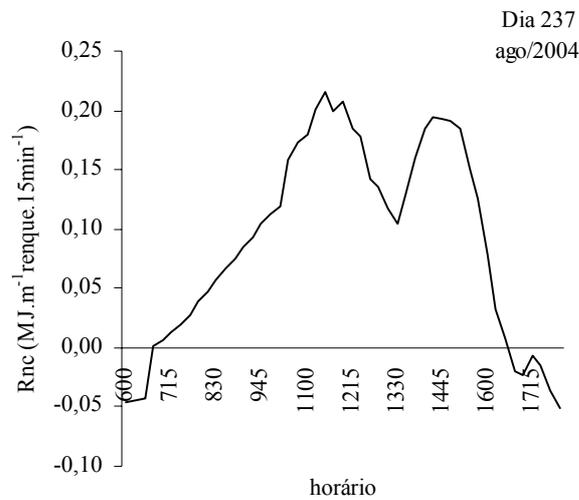


Figura 24 – Variação temporal do saldo de radiação do renque de café em formação (Rnc) com área foliar de $3,64 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{ renque}$, em dia de baixa nebulosidade

Em setembro de 2004 retomaram-se as medidas de Rnc para o mesmo trecho de renque, ocasião em que a área foliar era de apenas $1,42 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{ renque}$. A redução de AF teve como causas a ocorrência de doenças foliares e o processo de colheita manual. Nessa ocasião não se observou a ocorrência de histerese entre as medidas realizadas pela manhã e a tarde (Figura 25), salvo em pequeno grau quando se fez a correlação com Rg.

A área foliar concentrava-se na porção superior do renque, principalmente nas extremidades dos ramos, reduzindo em muito o auto-sombreamento das folhas. Assim, mesmo com uma área foliar 60% inferior à anterior, observou-se saldo de radiação do renque por unidade de área foliar superior, em alguns momentos, a $0,4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (Figura 25_c), enquanto que para AF de $3,64 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{ renque}$, os valores máximos de Rnc/AF foram de $0,22 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (Figura 23_c).

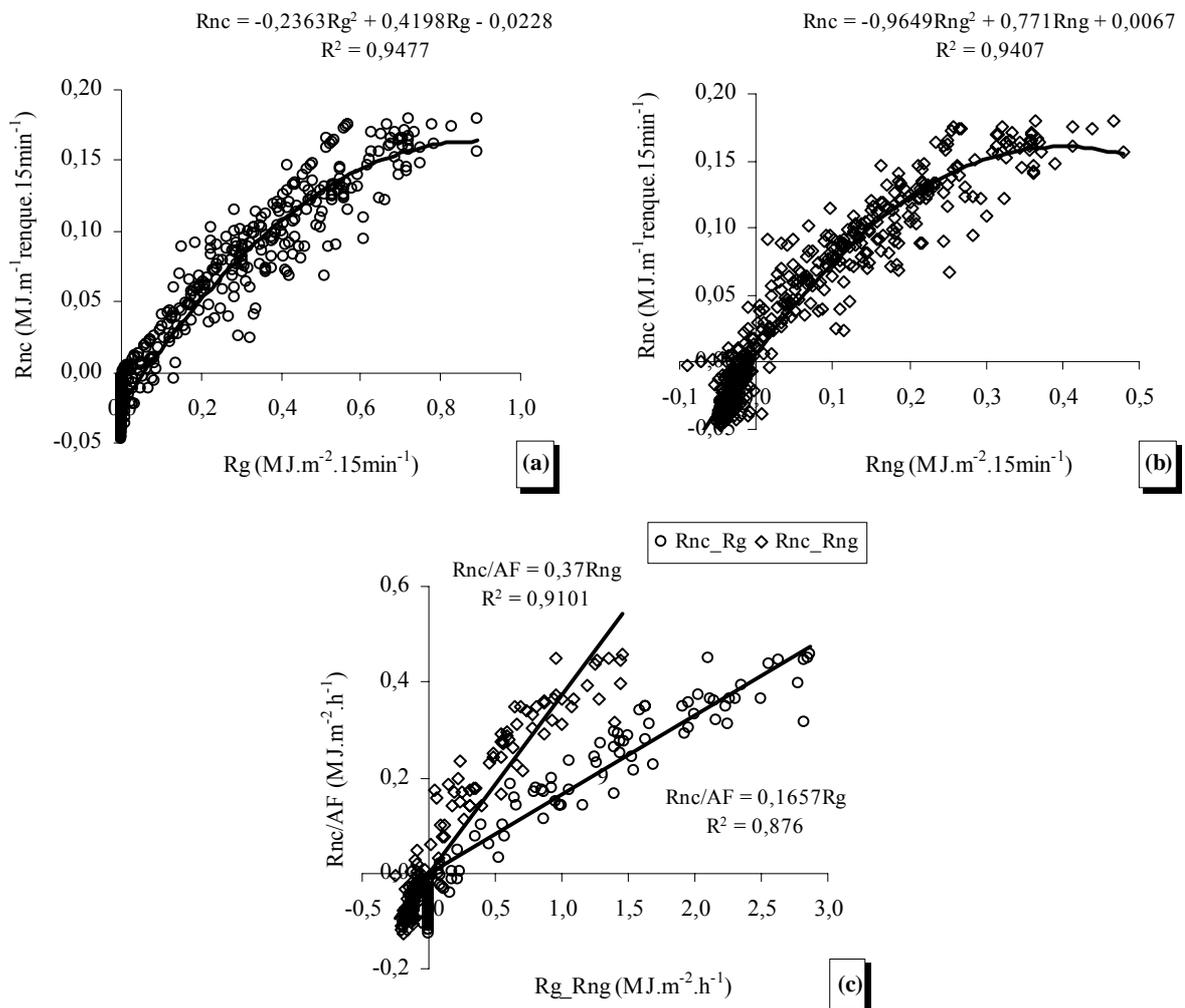


Figura 25 - Correlações do saldo de radiação do renque de cafeeiros em formação (Rnc) com irradiância solar global (Rg) e com o saldo de radiação de gramado (Rng) (a;b), na escala de 15 minutos, e as correlações entre o saldo de radiação do renque de cafeeiros em formação por unidade de área foliar (Rnc/AF) com Rg e Rng, na escala horária. Área foliar de 1,42 m².m⁻¹renque

Como as relações de Rnc com Rg e Rng não foram proporcionais à diminuição da área foliar, as relações entre Rnc/AF e Rg e Rnc/AF e Rng (Figura 25_c) apresentaram-se 100% superiores às observadas anteriormente (Figura 23_c). Como as medidas foram realizadas em épocas de declinação solar similar, atribui-se essa resposta diretamente ao efeito de área foliar e sua distribuição na copa dos cafeeiros.

Objetivando-se analisar mais amplamente o efeito da área foliar na formação do saldo de radiação dos renques, utilizando-se do mesmo trecho de renque do cafezal em formação, procederam-se desfolhações do renque, gerando cinco áreas foliares distintas. As Figuras 26 e 27

apresentam as correlações de R_{nc} com R_g e R_{ng} , para todas essas áreas foliares. Assim como verificado anteriormente (Figuras 23 e 25), os melhores ajustes foram obtidos entre R_{nc} e R_g , por ser a principal variável determinante do saldo de radiação das plantas no período diurno.

As medições foram iniciadas no mês de fevereiro de 2005, com AF de $12,61 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$, e finalizadas em maio, com AF de $4,68 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$. As sucessivas reduções de AF afetaram diretamente a absorção de energia radiante pelos cafeeiros, reduzindo-se de 1/3 os valores máximos de R_n para AF de $4,68 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$, quando comparado com aquele obtido para a AF de $12,61 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$ (Figura 26).

Além da influência da AF, os valores de irradiância solar global foram superiores durante as medidas com AF de $12,61 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$, superando a $0,8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 15 \text{min}^{-1}$, e influenciando diretamente na formação do saldo de radiação (Figura 26_a). Para as medidas seguintes, com AF de $10,63 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$, poucos períodos apresentaram R_g similar, e a partir do término dessas medidas, em 06 de abril, os valores R_g foram sempre inferiores (Figura 26).

Os valores de R_{nc} mostram-se crescentes, porém não proporcionais ao incremento em área foliar, assim como verificado entre as AF de $3,64 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$ (Figura 23) e $1,42 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{renque}$ (Figura 25). O incremento da AF em um volume pequeno, como a copa dos cafeeiros em formação, provoca aumento do auto-sombreamento de folhas. Assim, a radiação solar acaba sendo extinta nas camadas superiores do dossel (MARIN et al., 2003), não incidindo mais profundamente, gerando correlações específicas de R_{nc} com R_g e R_{ng} para cada área foliar (Figuras 26, 27 e 28).

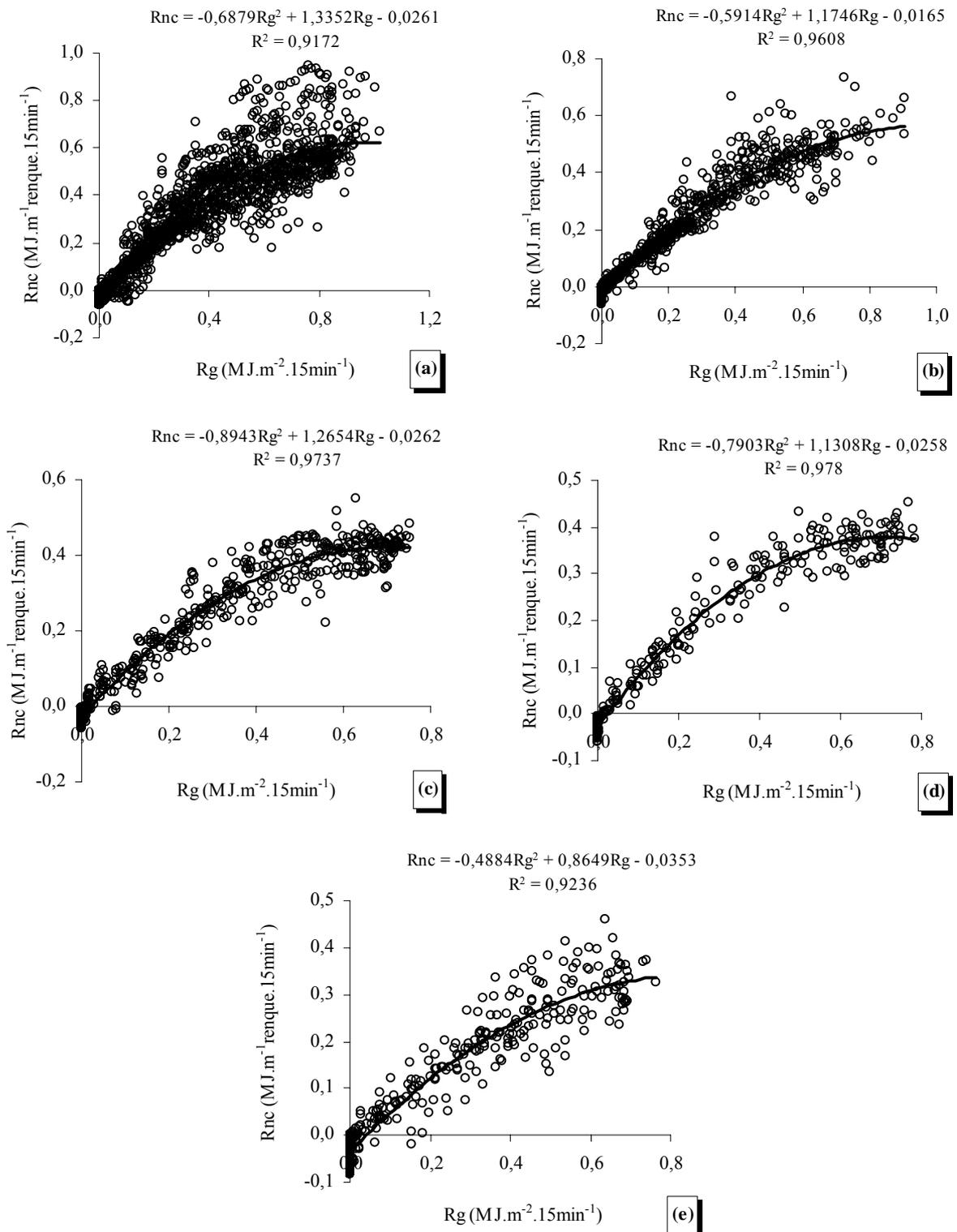


Figura 26 - Correlações do saldo de radiação por unidade de comprimento de renque de cafeeiros em formação (R_{nc}) com a irradiância solar global (R_g), na escala de 15 minutos. Áreas foliares de $12,61 m^2.m^{-1}renque$ (a), $10,63 m^2.m^{-1}renque$ (b), $8,72 m^2.m^{-1}renque$ (c), $6,63 m^2.m^{-1}renque$ (d) e $4,68 m^2.m^{-1}renque$ (e)

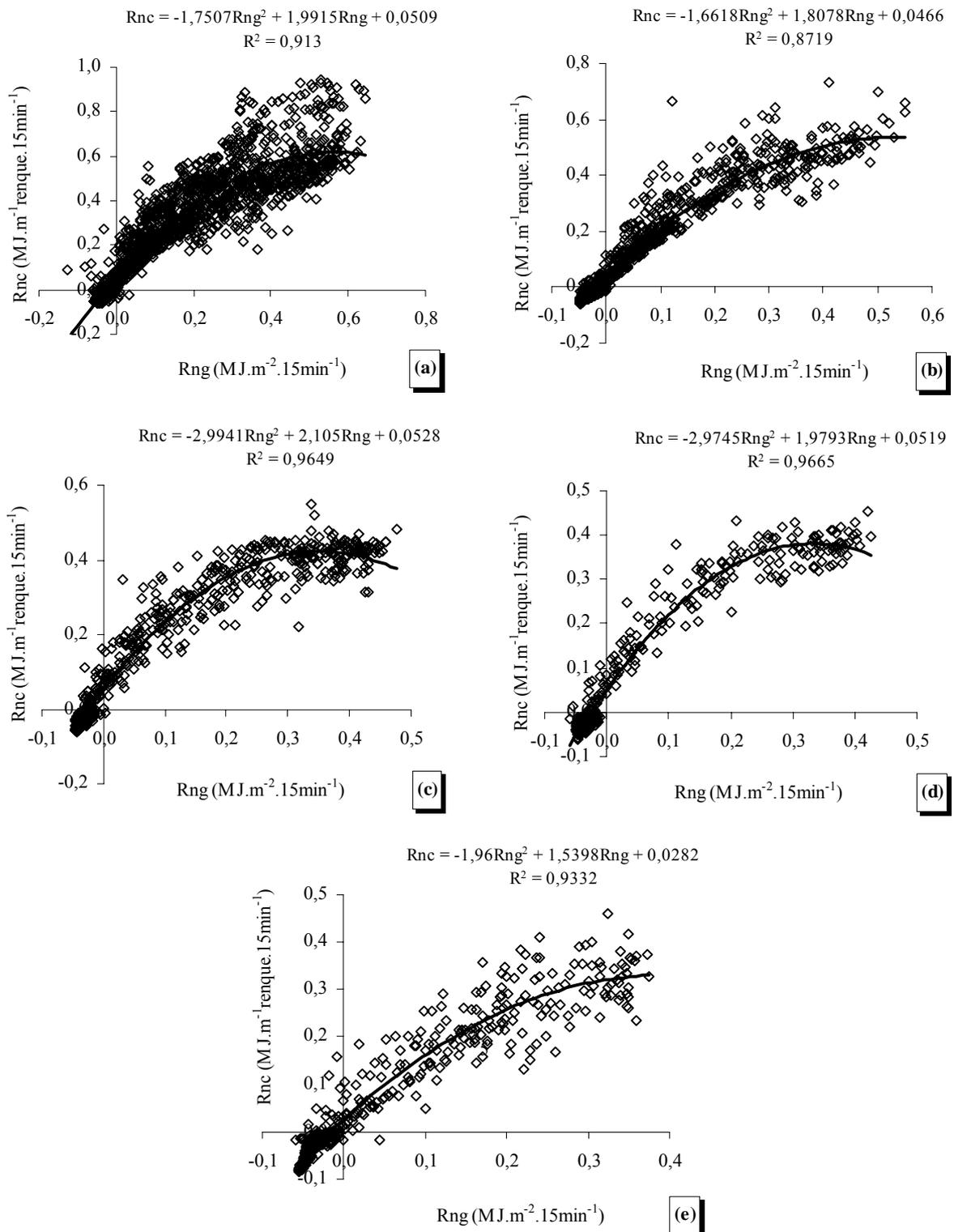


Figura 27 - Correlações do saldo de radiação por unidade de comprimento de renque de cafeeiros em formação (R_{nc}) com o saldo de radiação de gramado (R_{ng}), na escala de 15 minutos. Áreas foliares de $12,61 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ renque (a), $10,63 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ renque (b), $8,72 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ renque (c), $6,63 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ renque (d) e $4,68 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ renque (e)

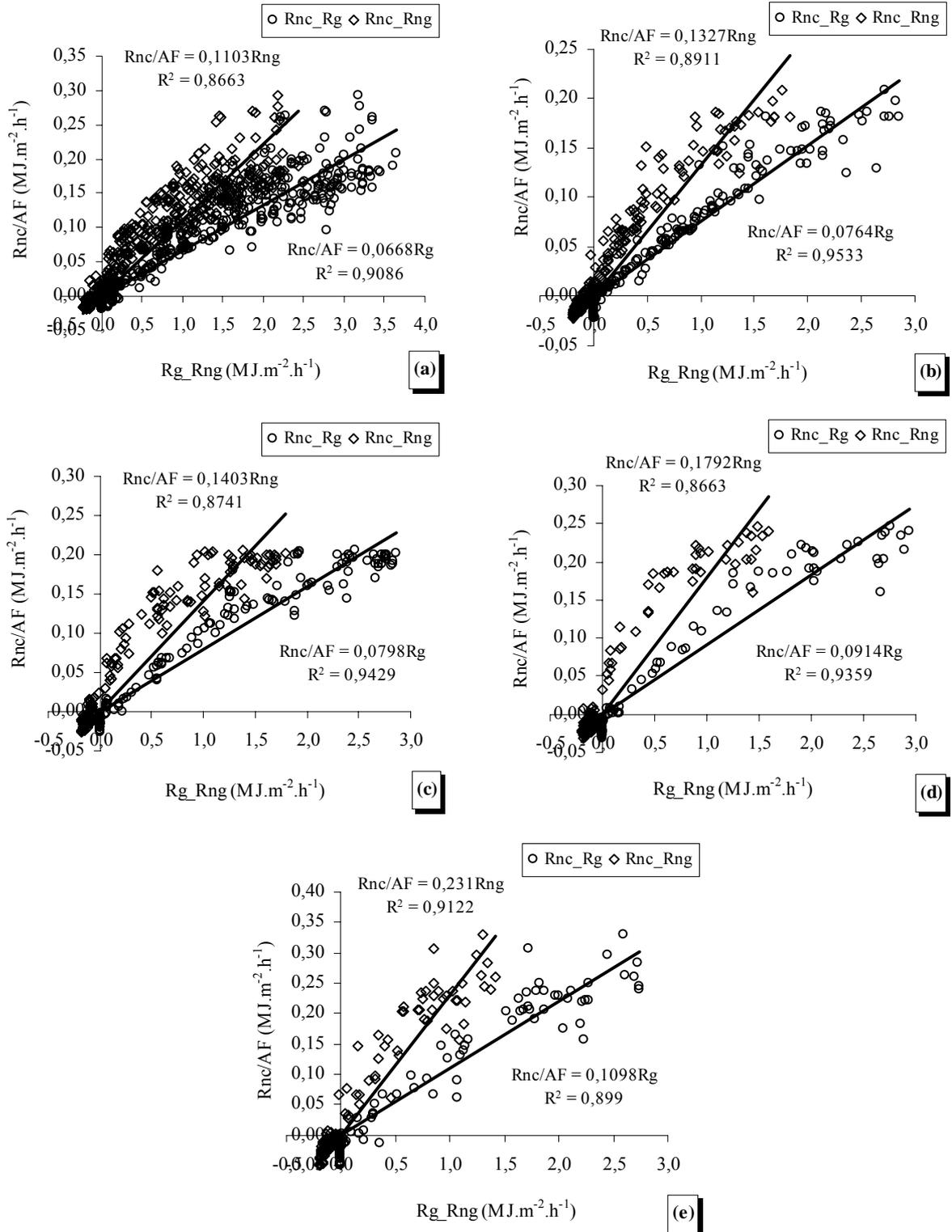


Figura 28 - Correlações do saldo de radiação do renque por unidade de área foliar (R_{nc}/AF), com irradiância solar global (R_g) e o saldo de radiação de gramado (R_{ng}), na escala horária. Áreas foliares de $12,61 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ renque (a), $10,63 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ renque (b), $8,72 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ renque (c), $6,63 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ renque (d) e $4,68 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ renque (e)

Verifica-se que não há um ajuste único de R_{nc}/AF com R_g ou R_{ng} para as sete áreas foliares avaliadas do cafezal em formação, na escala diária (Figuras 29_a, c). As Figuras 29 (b) e (d) apresentam as correlações entre R_{nc}/AF com R_g e R_{ng} para todas AF, não se obtendo bons ajustes entre as variáveis, com R^2 inferiores a 0,5. O ajuste inferior da relação entre R_{nc}/AF e R_{ng} (Figura 29_d) é atribuído, principalmente, às variações das características ópticas da superfície gramada durante a realização das medidas, função da oscilação entre períodos com e sem deficiência hídrica.

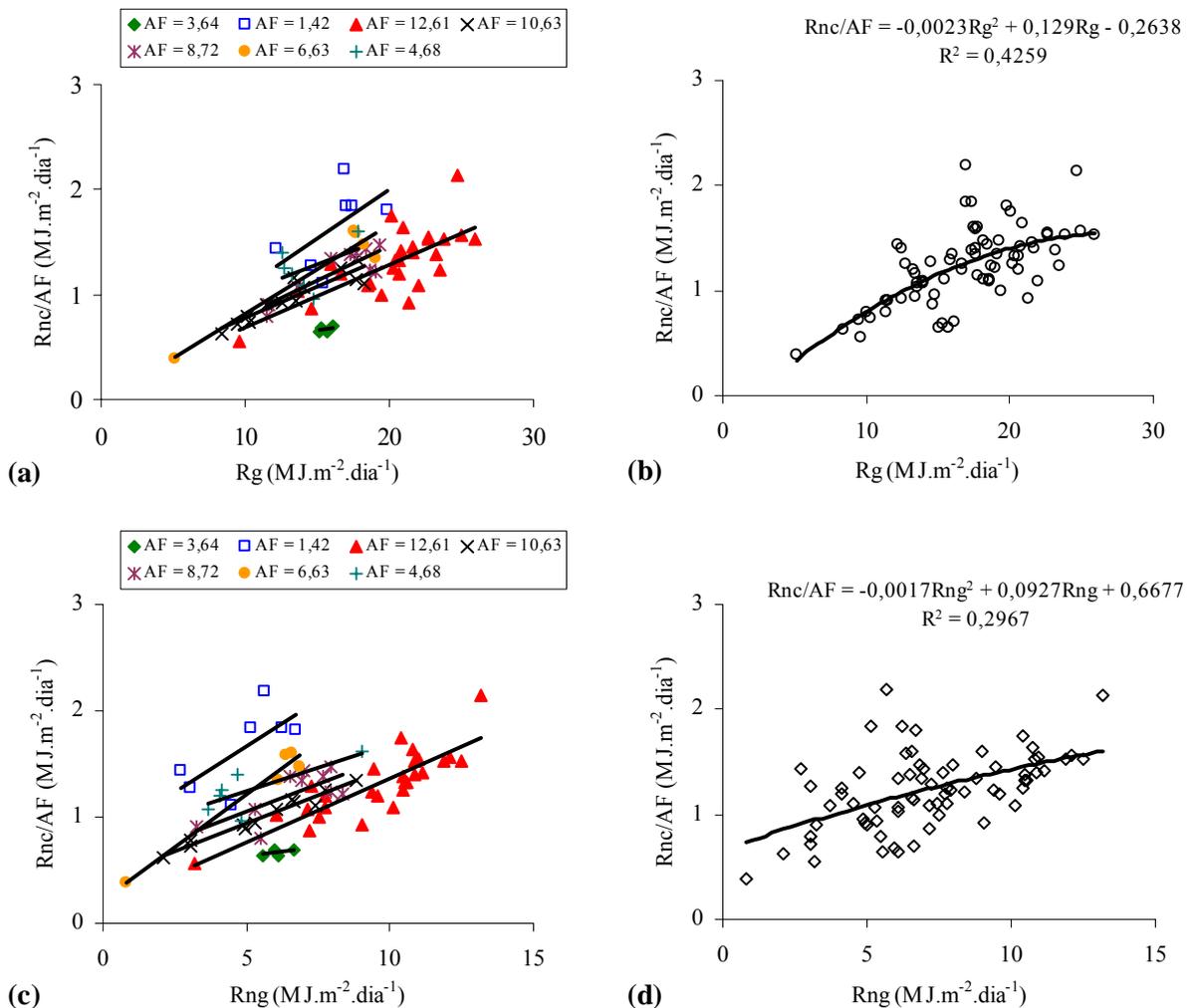


Figura 29 - Correlações do saldo de radiação diário do renque de cafeeiros em formação por unidade de área foliar (R_{nc}/AF), com a irradiância solar global (R_g) e o saldo de radiação de gramado (R_{ng}), para as sete áreas foliares por metro linear de renque (AF), na escala diária. (a) e (c): relações específicas para cada área foliar; (b) e (d): relações geral para todas as áreas foliares

2.3.5 Estimativa do saldo de radiação da árvore de laranjeira pelo uso da lei de Beer

Para a estimativa do saldo de radiação da árvore de laranjeira pelo uso da lei de Beer (eq. 7), utilizaram-se os coeficientes de extinção médios (k) para essa espécie (Tabela 2), inferiores aos verificados por Cohen e Fuchs, (1987) e Kalma, 1969 apud Cohen e Fuchs, (1987). Os valores médios de albedo (α) são similares aos valores médios diários de 0,16 à 0,17 descritos por Stanhill et al. (1965) e Monteith e Unsworth (1990) para a laranjeira (Tabela 2). Os valores de índice de área foliar (IAF) utilizados na determinação dos coeficientes de extinção (k), e para a estimativa do saldo de radiação, foram determinados com base na área projetada da copa (AP) da laranjeira sobre o solo (Tabela 2).

A Figura 30 apresenta as correlações entre o saldo de radiação estimados para a laranjeira, pelo uso da lei de Beer (Rnl_Beer) e o saldo de radiação da laranjeira medido (Rnl_med), para as áreas foliares de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (a), $27,3 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (b), $18,2 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (c) e $12,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (d). As estimativas foram realizadas apenas para o período entre 6:00 e 18:00h.

Os coeficientes angulares das equações geradas pelas análises de regressão mostram que o uso da lei de Beer não foi eficaz na estimativa do saldo de radiação da laranjeira. Os valores estimados foram sempre inferiores aos medidos, com uma subestimativa de quase 30% para a área foliar de $37,0 \text{ m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ (Figura 30_a), em intervalos de tempo de 15 minutos.

Originalmente a lei de Beer contempla a propagação de um feixe colimado de radiação monocromática através de um meio homogêneo. Apesar de estar avaliando-se a interceptação de radiação solar, portanto não monocromática, através da copa da árvore, os coeficientes de extinção não são muito variáveis entre os comprimentos de onda que a compõem, tornando a estimativa aplicável (CAMPBELL; NORMAN, 1998). Porém, a radiação solar divide-se numa fração direta e outra difusa, e para essa segunda porção a lei de Beer não é aplicável, o que pode ter tornado as estimativas inconsistentes.

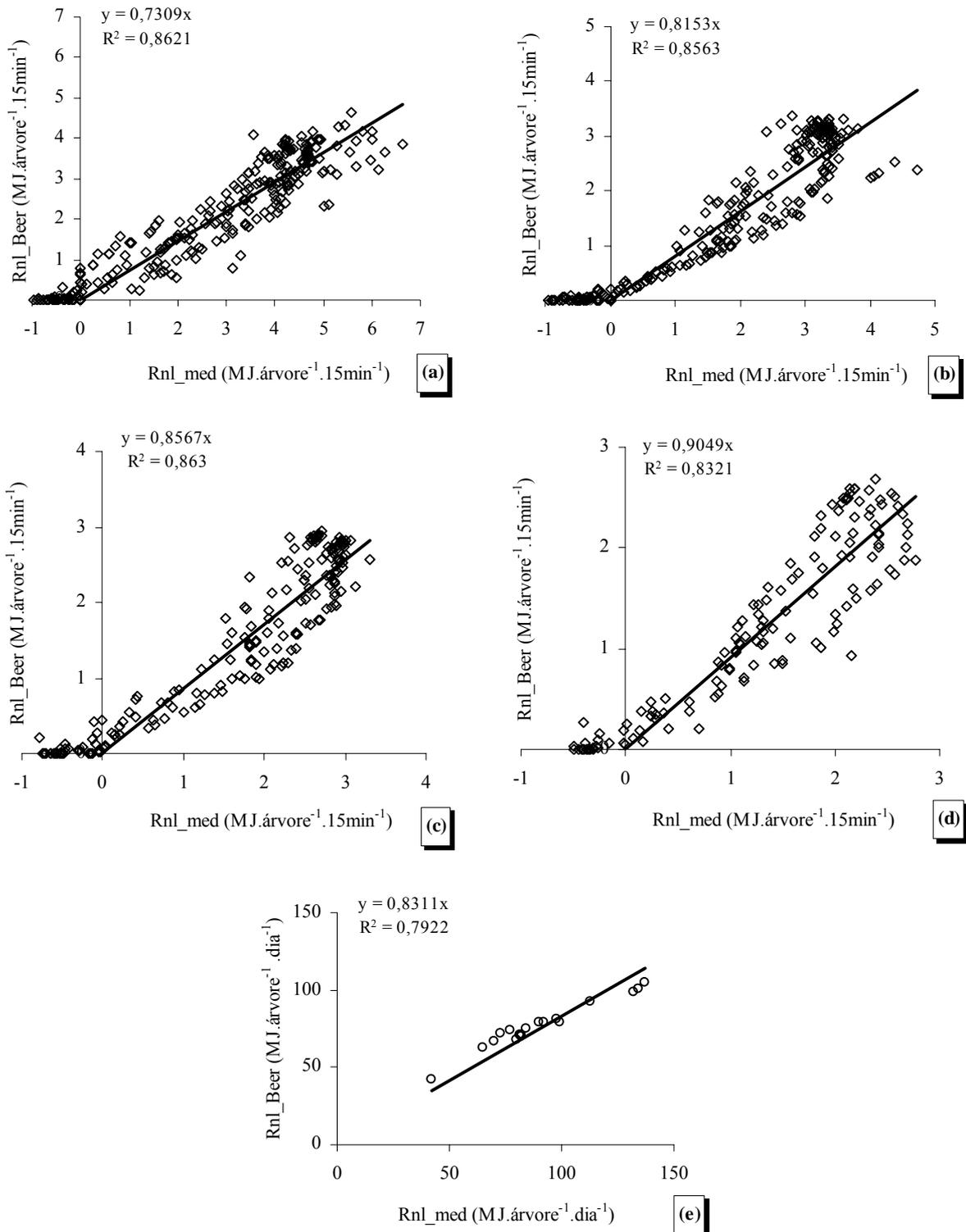


Figura 30 - Correlações do saldo de radiação medido da árvore de laranjeira (Rnl_med) e estimado pelo uso da lei de Beer (Rnl_Beer), para quatro valores de área foliar, na escala de 15 minutos, e entre Rnl_med e Rnl_Beer , para todas AF, no período diurno (e)

Ainda, assumindo-se que 95% da radiação solar é extinta ao longo do dossel, um caso extremo, verifica-se através da eq. (8) que a lei de Beer seria funcional para valores de índice de área foliar máximos ao redor de 5,5. Mesmo a laranjeira apresentando valores de IAF inferiores a 5,5, não foram obtidas boas estimativas do saldo de radiação pelo uso da lei. Uma grande limitação para o uso da lei de Beer para plantas isoladas está na geometria das árvores e na distribuição das folhas em seu volume, tornando a copa porosa, não caracterizando um meio homogêneo.

Uma possível causa da subestimativa de R_{nl} dada pela lei seria a estimativa de k , pois a medida da radiação solar incidente abaixo da árvore foi realizada com um piranômetro de fotodiodo de silício, que apresenta restrições de uso em locais com modificação do espectro solar, como ocorre nesse caso.

Na figura 30 (e) verifica-se que os valores integrados do período de 6:00 às 18:00 horas do saldo de radiação da laranjeira estimados pelo uso da lei de Beer subestimaram os valores medidos em praticamente 17%. Os resultados obtidos reforçam a limitação do uso dessa lei para estimativas do saldo de radiação em plantas arbóreas (Figura 30).

Tabela 2 - Área foliar para renque de cafeeiros ($m^2 \cdot m^{-1} \text{renque}$) e laranjeira ($m^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$) (AF), índice de área foliar (IAF), porosidade na vertical do dossel (%) (p), coeficientes de extinção (k), coeficiente de extinção do renque (k') e albedo (α), para o renque de cafeeiros e para a árvore de laranjeira

	Renque de cafeeiros					Laranjeira			
AF	4,68	6,64	8,64	10,64	12,62	12,0	18,2	27,3	37,0
IAF	4,6	6,6	8,6	10,6	12,6	1,40	2,13	3,20	4,32
p	30,0	22,0	18,0	17,0	16,0	45,0	36,0	18,0	8,8
k	0,77	0,57	0,43	0,40	0,15	0,69	0,56	0,43	0,40
k'	0,68	0,70	0,77	0,80	0,76	---	---	---	---
α	0,23	0,20	0,19	0,20	0,20	0,17	0,17	0,18	0,18

2.3.6 Estimativa do saldo de radiação do renque de cafeeiros pelo uso da lei de Beer

Estimou-se o saldo de radiação do renque de cafeeiros pelo uso da lei de Beer (eq. 7). Os valores médios do coeficiente de extinção (k), por representarem a extinção de irradiância solar global por índice de área foliar, foram inferiores aos mencionados por Jaramillo-Robledo (1994) e Castillo, 1993 apud Jaramillo-Robledo, (1994), entre 0,66 e 0,74, e aos determinados por Marin (2003), com valor médio diário de 0,49, estimado para o saldo de radiação. Os valores de albedo médios para o renque de cafeeiros aproximou-se ao de gramado e outras vegetações (MONTEITH; UNSWORTH, 1990; CAMPBELL; NORMAN, 1998) (Tabela 2).

A Figura 31 apresenta as correlações entre o saldo de radiação estimado para o renque de cafeeiros em formação, pelo uso da lei de Beer (R_{nc_Beer}) e o saldo de radiação do renque medido (R_{nc_med}), para as áreas foliares de 12,61 $m^2 \cdot m^{-1}$ renque (a), 10,63 $m^2 \cdot m^{-1}$ renque (b), 8,72 $m^2 \cdot m^{-1}$ renque (c), 6,63 $m^2 \cdot m^{-1}$ renque (d) e 4,68 $m^2 \cdot m^{-1}$ renque (e).

Como anteriormente descrito, a equação baseada na lei de Beer apresenta funcionalidade para valores de IAF máximos ao redor de 5,5, verificado para muitas das culturas de interesse agrícola. Os cafeeiros, porém, apresentavam alta área foliar, com valor máximo de 12,61 $m^2 \cdot m^{-1}$ renque (Figura 31_a). Os cafeeiros tinham pequena estatura, com largura média de 1,0 m, contidas no espaçamento de 0,9 m entre plantas no renque, resultando numa área de projeção de 0,9 m^2 . Determinando-se o IAF em função dessa área projetada, para as duas maiores AF, obteve-se IAF iguais de 12,6 e 10,6 (Tabela 2). Para essas duas situações, a equação de estimativa de R_{nc} baseada na lei de Beer não foi funcional, subestimando os valores de R_{nc} medidos em até 17% (Figura 31_a, b).

Após duas desfolhas, o índice de área foliar era de 8,6, obtendo-se melhor ajuste da análise de regressão, verificando subestimativa inferior a 2%. Os coeficientes angulares das equações geradas para os demais valores de IAF (Figura 31_d, e) mostram que os saldos de radiação estimados superestimaram as medidas. Ajuste semelhante para renques de cafeeiros com IAF de 4,3, foram obtidos por Marin (2003), com uma superestimativa de cerca de 10%.

Correlacionando-se os valores do saldo de radiação estimados (R_{nc_Beer}) e medidos (R_{nc_med}) integrados para o período diurno, entre 06:00 às 18:00h, para todas as AF, verifica-se subestimativa de 8% (Figura 31_f).

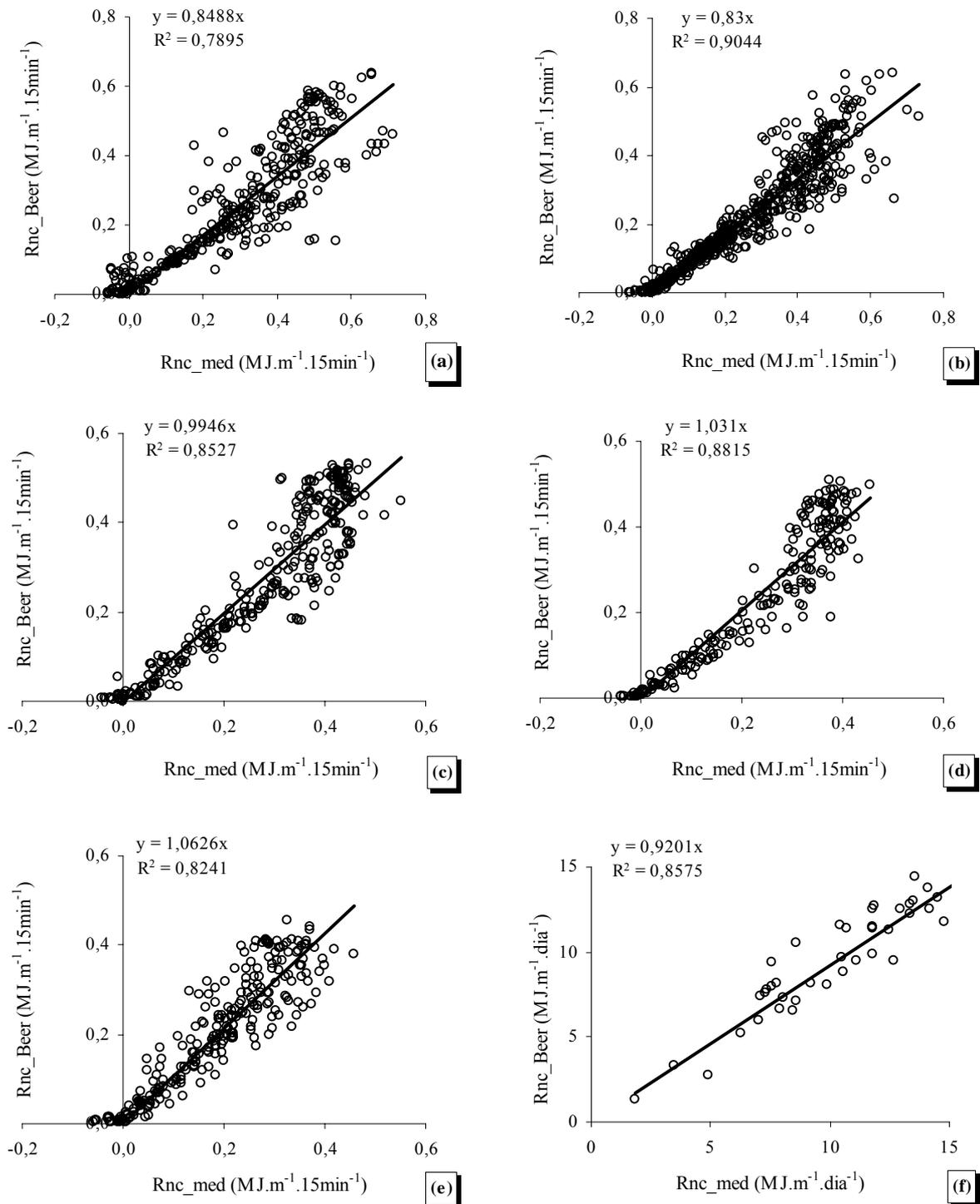


Figura 31 - Correlações do saldo de radiação medido do renque de café em formação por unidade de comprimento de renque (Rnc_med) e estimado pelo uso da lei de Beer (Rnc_Beer), para cinco valores de área foliar, na escala de 15 minutos, e entre Rnc_med e Rnc_Beer , para todas AF, no período diurno, das 06:00 às 18:00h (f)

Apesar de estimar com boa precisão o saldo de radiação para o renque de cafeeiros com índice de área foliar inferior a 8,6 (Figura 31_c, d, e), deve-se atentar para as limitações de uso da lei de Beer para cultivos esparsos.

2.3.7 Estimativa do saldo de radiação da copa de laranjeira pelo modelo proposto

Típico de árvores de citros, a laranjeira apresentava grandes ramos, também chamados de pernas, com grande área de captação de energia radiante. Com as sucessivas desfolhações, formaram-se espaços vazios na copa da árvore, e a área dos ramos tornou-se cada vez mais exposta à radiação. Observa-se na Figura 32 que o saldo de radiação dos ramos equivaleu à cerca de 1/3 do R_{nl} obtido para a árvore quando sua área foliar era de $37\text{m}^2\cdot\text{árvore}^{-1}$. Com esse resultado, mensurando-se separadamente nas fotografias digitais as áreas de folhas, ramos e poros, a porosidade foi então corrigida, adotando-se o critério de que 1/3 da área detectada como sendo de ramos na fotografia atuava de forma equivalente a folhagem em termos de absorção de radiação e 2/3 corresponderia à porosidade.

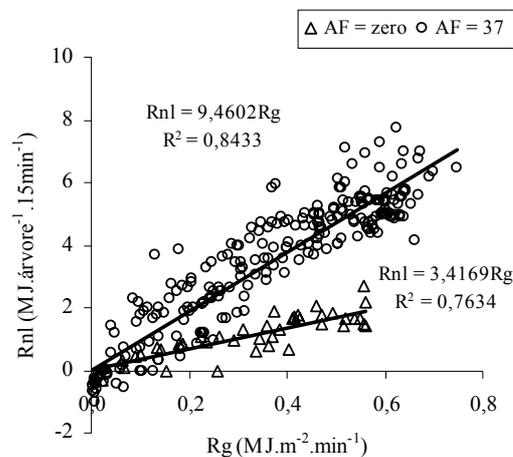


Figura 32 - Correlações entre o saldo de radiação da árvore de laranjeira para a AF zero e $37,0\text{ m}^2\cdot\text{árvore}^{-1}$ e a irradiância solar global

A Figura 33 (a) ilustra a variação temporal dos valores estimados de $R_{nl_rad. direta}$ e $R_{nl_rad. difusa}$ para o dia 165 de 2005, quando a árvore tinha área foliar de $18,2\text{ m}^2\cdot\text{árvore}^{-1}$. Verifica-se que a curva de $R_{nl_rad. direta}$ acompanha as variações da curva de medida da radiação solar direta (Rad. direta) ao longo de todo período de medida, sendo a maior responsável

pela formação do saldo de radiação nesse dia. Mesma resposta ocorre entre $Rnl_rad.\ difusa$ e a curva de medida da radiação difusa (Rad. difusa).

Integrando-se as curvas de $Rnl_rad.\ direta$ e $Rnl_rad.\ difusa$ tem-se o saldo de radiação estimado da copa da laranjeira (Rnl_est) (Figura 33_b). Verifica-se valores negativos para o início e o final do período diurno, da curva do saldo de radiação medido (Rnl_med), enquanto a curva dos valores estimados (Rnl_est) tem valores positivos, pois o modelo desconsidera o balanço de radiação de onda longa. Ao decorrer do período diurno, há momentos de super e subestimativas dos valores de Rnl estimados em relação aos medidos, pois a geometria da copa da árvore não é perfeitamente esférica como assumida pelo modelo, ocasionando flutuações da curva de Rnc_est em relação curva de Rnc_med .

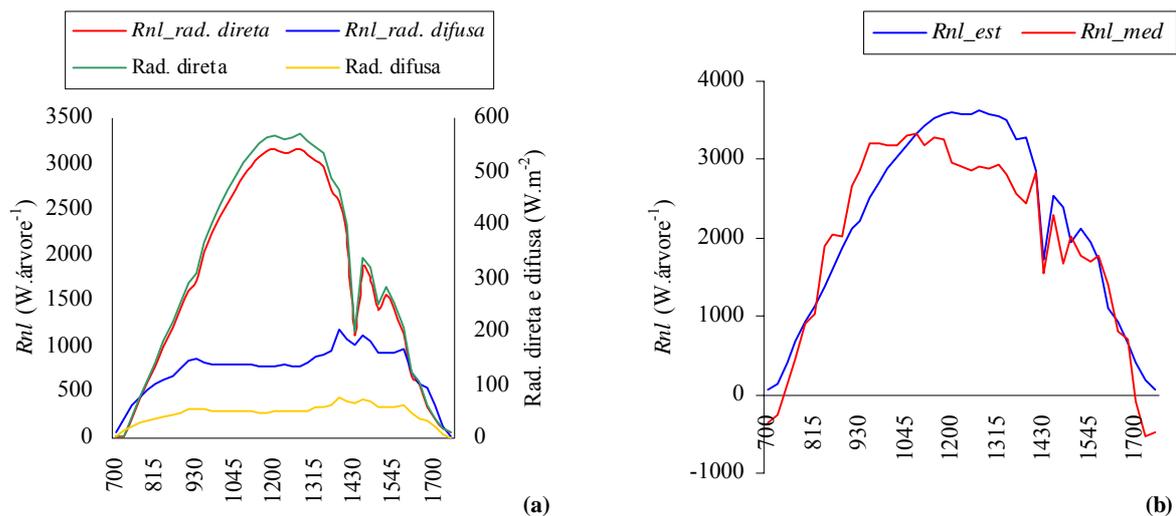


Figura 33 - Variação temporal dos componentes de radiação direta ($Rnl_rad.\ direta$) e radiação difusa ($Rnl_rad.\ difusa$) do modelo de saldo de radiação da copa de laranjeira; são mostradas, também, as curvas de irradiância solar direta e difusa (a). Curvas do saldo de radiação estimado (Rnl_est) e medido (Rnl_med) da árvore de laranjeira (b)

Na Figura 34 têm-se as correlações entre o saldo de radiação medido (Rnl_med) e estimado pelo modelo proposto (Rnl_est), para o período diurno, entre 06:00 e 18:00h. Verifica-se bons níveis de concordância entre os valores estimados e medidos para as quatro áreas foliares, com os coeficientes angulares das equações apontando pequena subestimativa dos valores estimados para a área foliar de $18,2\ m^2.\acute{a}rvore^{-1}$, e superestimativas para as demais AF, para períodos de 15 minutos.

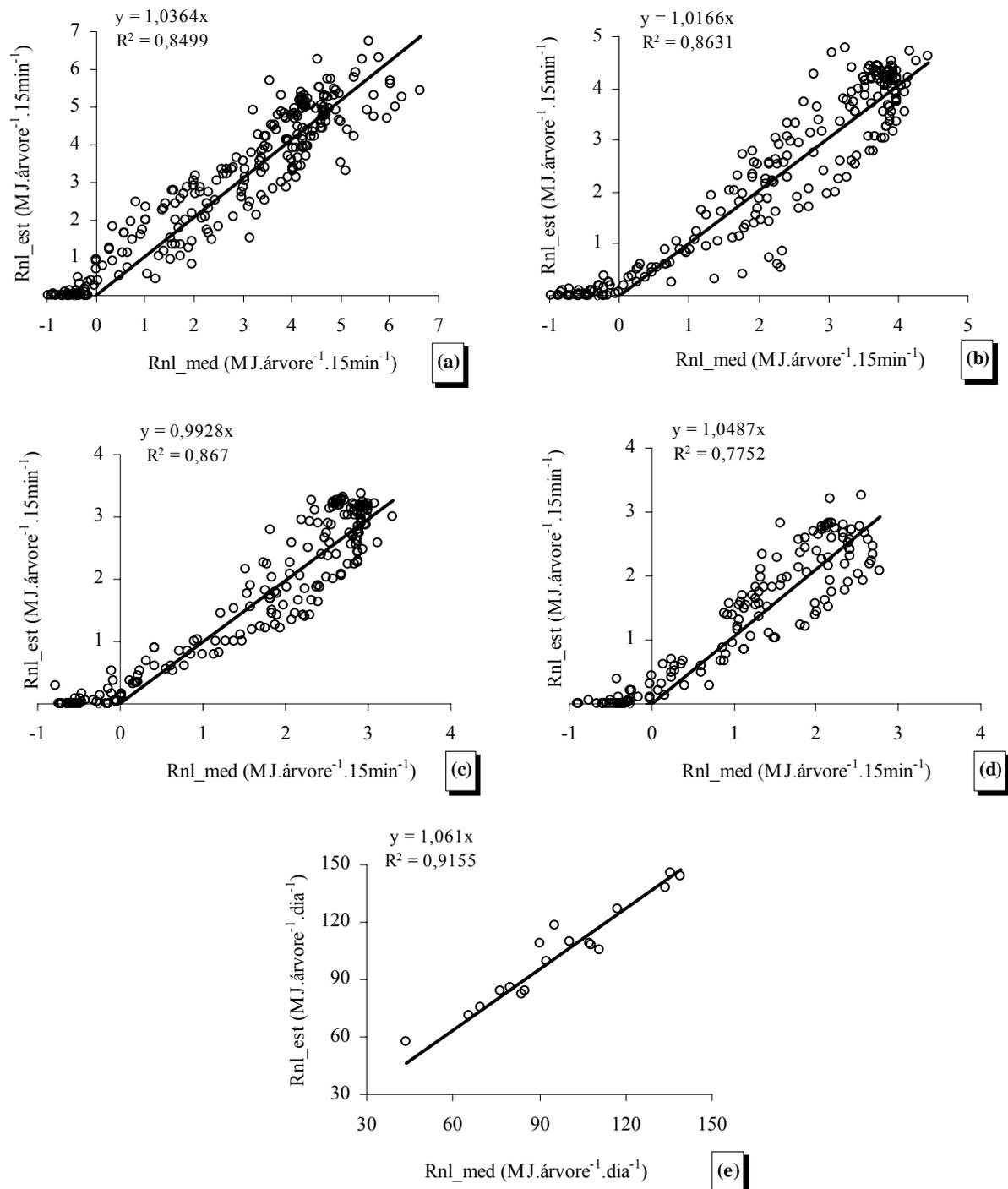


Figura 34 - Correlações entre o saldo de radiação medido para a árvore de laranjeira (Rnl_med) e o estimado pelo modelo proposto (Rnl_est), para as área foliar de $37,0 \text{ m}^2.\text{árvore}^{-1}$ (a), $27,3 \text{ m}^2.\text{árvore}^{-1}$ (b), $18,2 \text{ m}^2.\text{árvore}^{-1}$ (c) e $12,0 \text{ m}^2.\text{árvore}^{-1}$ (d), na escala de 15 minutos, e entre Rnl_est e Rnl_med , para as quatro AF, na escala diurna, das 06:00 às 18:00h (e)

Ao se comparar os saldos de radiação estimados para a laranjeira (R_{nl_est}), para as quatro áreas foliares, aos medidos (R_{nl_med}) e integrados para o período diurno, tem-se uma superestimava dos valores de R_{nl_med} de cerca de 6,1% (Figura 34_e).

Frente aos resultados obtidos e considerando-se as dificuldades em realizar a medida do saldo de radiação para espécies arbóreas, como a laranjeira, verifica-se que apesar de sua simplicidade, exigindo poucos parâmetros de entrada para a estimativa do saldo de radiação da árvore isolada, o modelo proposto apresentou-se funcional (Figura 34). Cabe testá-lo para outras espécies arbóreas de geometria similar, caracterizando uma árvore isolada. O modelo proposto para a estimativa do saldo da laranjeira considera apenas o balanço de ondas curtas, negligenciando o balanço de ondas longas, sendo funcional apenas para períodos com irradiância solar global (R_g). Essa limitação do modelo ocasiona a correlação de valores de saldo de radiação medidos (R_{nl_med}) negativos, registrados ao amanhecer e entardecer, à saldos de radiação positivos estimados pelo modelo (R_{nl_est}).

Deve-se ressaltar que embora tenha havido algumas tentativas de uso de modelos de interceptação de radiação pela folhagem de espécies arbóreas “isoladas”, alguns deles não foram testados (CHARLES-EDWARDS, THORNLEY, 1973; WARREN WILSON, 1981). O modelo proposto por Green et al. (2003), para árvores “isoladas” de macieiras, apesar de não estar descrito físico-matematicamente em seu trabalho, apresentando apenas algumas referências das quais o modelo seria similar, é o único na literatura a ter suas estimativas comparadas a medidas do saldo de radiação integradas espaço-temporalmente, apresentando superestimativa de 2% em relação aos valores medidos. Tomando-se como base os trabalhos citados e utilizados por esses autores para o desenvolvimento de suas equações, o modelo proposto para a estimativa do saldo de radiação da árvore “isolada” de laranjeira é mais simplificado, exigindo menos parâmetros de entrada para proceder-se as estimativas, e mesmo assim proporcionou estimativas com precisão muito similar à encontrada no trabalho de Green et al. (2003)

2.3.8 Estimativa do saldo de radiação de renque de cafeeiros pelo modelo proposto

Os valores estimados pelo modelo foram confrontados com valores de saldo de radiação do renque medidos em 2005, para os cinco valores de área foliar (Tabela 2), porque em 2004 não

foram realizadas medidas da radiação solar incidente abaixo da copa dos cafeeiros e da radiação solar refletida pelo renque, simultaneamente as medições do saldo de radiação do renque. Com a ausência dessas medidas, k e α não puderam ser estimados nesse ano. Medidas da radiação solar difusa também não foram realizadas para essa mesma época, impossibilitando a estimativa do saldo de radiação do renque pelo modelo proposto.

A Figura 35 (a) apresenta as três curvas de variação temporal de estimativa das componentes do modelo de estimativa do saldo de radiação do renque de cafeeiros, referentes às eq. (22), (23) e (25), que somadas formaram o saldo de radiação total do renque, para o dia 62 de 2004, com área foliar de $12,61 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ renque, para o período das 06:00 às 18:00h, obtendo-se excelente ajuste entre as curvas de valores medidos e estimados de R_{nc} ao longo do período diurno (Figura 35_b). A curva $Iv_{rad. direta}$ (eq. 22), representa a energia radiante global absorvida pelas “paredes” laterais do renque em função da radiação solar direta, a de I_h (eq. 23) a energia radiante absorvida pela “parede” superior do renque, e a de $Iv_{rad. difusa}$ (eq. 25), a energia radiante absorvida pelas “paredes” laterais, porém em função da radiação solar difusa.

Analisando-se as curvas $Iv_{rad. direta}$ e $Iv_{rad. difusa}$, verifica-se que a absorção de radiação solar difusa superou a de radiação solar direta. Primeiramente, os baixos valores de radiação solar direta identificam um dia com elevado grau de nebulosidade, aumentando assim a porcentagem da radiação solar difusa. A radiação solar direta apresenta incidência em apenas uma das “paredes” laterais do renque ao longo do dia, devido a geometria dos renques e ao movimento solar. Contrariamente, a radiação difusa é interceptada pelas duas “paredes” laterais concomitantemente, pesando bastante na formação do saldo de radiação do renque para esse dia.

Observando-se a curva de $Iv_{rad. direta}$, verifica-se R_{nc} igual a zero às 12:15h (Figura 35_a). Nesse dia e horário, o modelo determinou uma diferença entre o azimute do renque e do Sol igual a zero. Dessa forma, os raios solares incidem paralelamente às “paredes” laterais do renque, e o modelo considera não haver interceptação de radiação solar direta, o que corresponde a uma realidade.

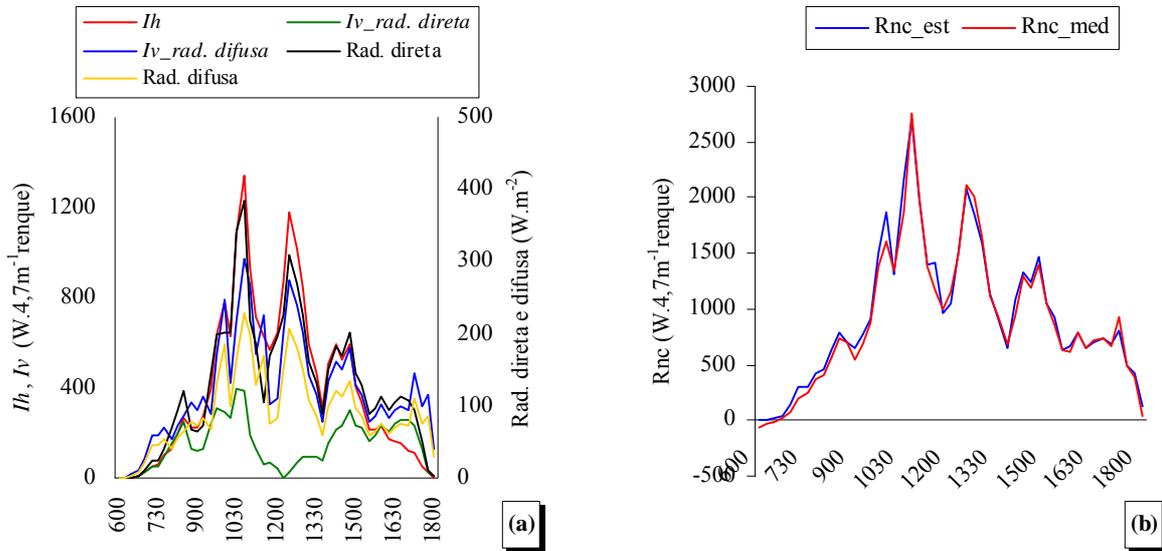


Figura 35 – Variação temporal da estimativa das componentes do saldo de radiação do renque de cafeeiros na “parede” horizontal do renque em função da irradiância solar global (I_h), nas “paredes” verticais em função da radiação solar direta ($Iv_rad.\ direta$), nas “paredes” verticais em função da radiação solar difusa ($Iv\ rad.\ difusa$), juntamente com a variação das irradiâncias solares direta ($Rad.\ direta$) e difusa ($Rad.\ difusa$) medidas (a) Variação temporal do saldo de radiação estimado (Rnc_est) e do medido (Rnc_med) do renque de cafeeiros no mesmo dia (b)

A Figura 36 apresenta as correlações entre os valores do saldo de radiação do renque de cafeeiros medidos (Rnc_med) e estimados pelo modelo (Rnc_est), para as cinco AF, com bons níveis de ajuste das análises de regressão. Forçando-se a passagem da reta da equação pela origem dos eixos, verifica-se superestimativa média inferiores a 7,5% (Figura 36_a,b), e coeficientes angulares praticamente iguais a 1 para as demais AF, para períodos de 15 minutos.

Como o modelo proposto avalia apenas o balanço de energia radiante de ondas curtas, excluindo o de ondas longas, as estimativas foram realizadas apenas para o período diurno, entre 06:00 e 18:00h. Ao excluir-se o balanço de energia de ondas longas, o modelo gera erros de estimativa do saldo de radiação para os renques de cafeeiros nos momentos de nascer e pôr-do-sol. Nesses horários (Figura 26), mesmo sob valores de R_g positivos, o balanço de radiação de onda longa foi superior ao de onda curta, registrando-se Rnc negativo.

Correlacionando-se Rnc_med e Rnc_est , para todas AF, integrados para o período diurno, com radiação solar, situação em que o modelo proposto torna-se funcional, obteve-se novamente elevado nível de ajuste mostrado pela análise de regressão, com uma superestimativa de cerca de 5% (Figura 36_f).

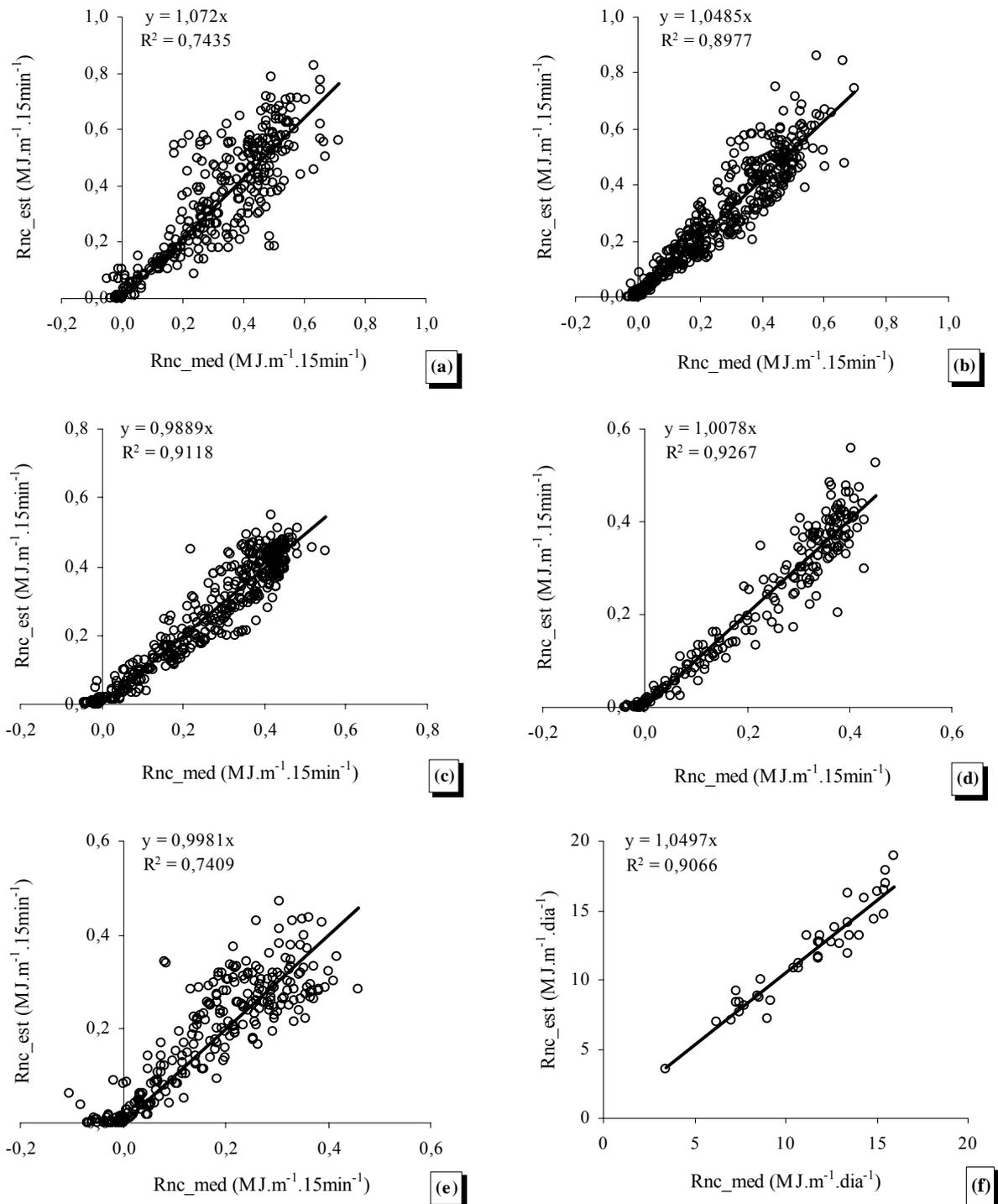


Figura 36 - Correlações entre o saldo de radiação do renque de cafeeiros medidos (Rnc_{med}) e o estimado pelo modelo proposto (Rnc_{est}), para as áreas foliares de 12,61 m².m⁻¹renque, 10,63 m².m⁻¹renque, 8,72 m².m⁻¹renque, 6,63 m².m⁻¹renque e 4,68 m².m⁻¹renque, na escala de 15 minutos, e entre Rnc_{med} e Rnc_{est} , para as cinco áreas foliares, na escala diurna (f)

Os elevados níveis de ajustes obtidos demonstram que o modelo proposto é preciso na estimativa do saldo de radiação dos renques desse cafezal. Cabe testá-lo em outras situações, principalmente em orientação de linhas de plantio diferentes, espaçamento entre renque, e dimensões de renque. Para sua melhoria, estuda-se a inclusão do balanço de radiação de onda longa e o efeito de sombreamento entre renques, que devido a pequena dimensão dos cafeeiros avaliados mostrou-se desnecessário.

Mesmo sendo mais simplificado perante alguns modelos de interceptação de radiação pela folhagem de renques de espécies arbóreas (CHARLES-EDWARDS; THORPE, 1976; PALMER, 1977; MELO-ABREU; SNYDER; RIBEIRO, 2002), e Riou; Valancogne e Pieri, 1989, do qual foram utilizadas algumas premissas para o desenvolvimento do modelo aqui proposto, este apresentou níveis similares de funcionalidade e precisão nas estimativas, inclusive sendo testado numa maior variação de densidade de folhagem e com suas estimativas comparadas ao saldo de radiação integrado espaço-temporalmente, o que não é verificado nos trabalhos citados.

3 CONCLUSÕES

Os sistemas móveis de integração espaço-temporal do saldo de radiação da copa de plantas “isoladas” num pomar, como de laranjeiras, e da folhagem em trechos de renques em culturas como cafezais, apresentaram desempenho adequado, mostrando-se muito úteis para testes de modelos de estimativa do saldo de radiação.

Foram encontradas boas correlações entre o saldo de radiação da laranjeira (R_{nl}) com a irradiância solar global (R_g) e o saldo de radiação de gramado (R_{ng}), específicos para cada área foliar da árvore (AF) e época do ano.

Na escala diária, as relações de R_{nl}/AF ou R_{nl} expresso por unidade de área projetada da copa no solo (R_{nl}/AP) com R_g apresentaram bons níveis de ajuste independentemente da área foliar ou época do ano, indicando a possibilidade de encontrar-se uma função de transferência entre R_{nl} e R_g .

Entretanto, o uso da relação entre R_{nl}/AF e R_{ng} na escala diária mostrou a dificuldade de se encontrar uma função única de transferência entre as variáveis. Porém, ao correlacionar-se R_{nc}/AP com R_{ng} , obteve-se melhor ajuste da análise de regressão, indicando também a possibilidade de encontrar-se uma função de transferência entre R_{nl} e R_{ng} , em função da área projetada da copa.

As boas correlações do saldo de radiação do renque de cafeeiros formados (R_{nc}) com R_g e R_{ng} , para todas as escalas de tempo testadas, indicam a possibilidade de se estimar o saldo de radiação do renque a partir dessas variáveis, para a situação do cafezal estudado.

Para os cafeeiros em formação, foram obtidos bons ajustes de R_{nc} com R_g e R_{ng} , nas escalas de 15 min e horária, específicos para cada valor de AF . As análises de regressão não apresentaram bons ajustes de R_{nc}/AF com R_g e R_{ng} , independentemente da área foliar, na escala diária, indicando a dificuldade de encontrar-se uma função de transferência entre as variáveis para os cafeeiros em formação.

O uso da equação baseada na lei de Beer apresentou-se limitada para a estimativa do saldo de radiação da folhagem em ambas as culturas testadas, com elevada subestimativa em relação aos valores medidos para todas as áreas foliares em laranjeira, e para as áreas foliares de $12,61 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ renque e $10,63 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ renque para cafeeiros em formação, para a escala de 15 min. Para os valores integrados no período diurno, a subestimativa foi de 17%, independente da área

foliar, para a laranjeira, enquanto para os cafeeiros em formação, a subestimativa média foi de 8%, independente da área foliar.

Os modelos físico-matemáticos propostos para a estimativa do saldo de radiação da árvore de laranjeira e do trecho de renque de cafeeiros, validados perante medidas do saldo de radiação obtidas pelos sistemas de integração espaço-temporal, apresentaram valores nas escalas de 15 min e diurna com concordância muito boa com os valores medidos.

REFERÊNCIAS

ALLEN, L.H. Model of light penetration into a wide row crop. **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, p. 41-47, 1974.

ANGELOCCI, L.R. **Estimativa da transpiração máxima de macieiras (*Malus spp.*) em pomares pelo método de Penman-Monteith**. 1996. 103 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

ANGELOCCI, L.R.; VILLA NOVA, N.A. Medida de saldo de energia radiante na copa de lima ácida “Tahiti” e sua relação com a medida sobre gramado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11., REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 2., 1999, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBA, EPAGRI, 1999. 1 CD-ROM.

ANGELOCCI, L.R.; VILLA NOVA, N.A.; COELHO FILHO, M.A. Relações entre o saldo de radiação na copa da árvore e a irradiância solar global em pomar de lima ácida “Tahiti”. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 3., 2001, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBA, 2001. p. 817-818.

ANGELOCCI, L.R.; MARIN, F.R.; RIGHI, E.Z.; FAVARIN, J.L. Determinação do saldo de radiação de renque de cafeeiros em plantio semi-adensado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13., SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS DA AGROMETEOROLOGIA, v. 1, 2003, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UNIFRA, SBA, UFSM, 2003. p. 75-76.

ANGELOCCI, L.R.; VILLA NOVA, N.A.; COELHO FILHO, M.A.; MARIN, F.R. Measurements of net radiation absorbed by isolated acid lime trees (*Citrus latifolia* Tanaka). **Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, Coventry, v. 79, n. 5, p. 699-703, 2004.

ANNANDALE, J.G.; JOVANOVIĆ, N.Z.; CAMPBELL, G.S.; DU SANTOY, N.; LOBIT, P. Two-dimensional solar radiation interception model for hedgerow fruit trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 121, p. 207-225, 2004.

ASSIS, F.N.; MENDEZ, M.E.G.; MARTINS, S.R.; VERONA, L.A. Balanço de radiação na cultura do sorgo sacarino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 4, p. 349-352, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA ÍNDUSTRIA DE CAFÉ. Disponível em: <<http://www.abic.com.br>>. Acesso em: 30 maio 2005.

BROUGHAM, R.W. Interception of light by the foliage of pure and mixed stands of pasture plants. **Australian Journal of Agricultural Research**, Coolingwood, v. 9, p. 39-52, 1958.

- BUTLER, D.R. Estimation of the transpiration rate in an apple orchard from net radiation and vapour pressure deficit measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdan, v. 16, p. 277-289, 1976.
- CAMARGO, A.P. de; CAMARGO, M.B.P. de. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.
- CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. **An introduction to environmental biophysics**. 2.ed. New York: Springer-Verlag, 1998. 286 p.
- CARDOSO, A.P.S. **Café: cultura e tecnologia primária**. Lisboa: Ministério do Planeamento e da Administração do Território, Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia, Instituto de Investigação Científica Tropical, 1994. 169 p.
- CARR, M.K.V. The water relations and irrigation requirements of coffee. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 37, n. 1, p.1-36, 2001.
- CHARLES-EDWARDS, D.A.; THORNLEY, J.H.M. Light interception by an isolated plant. A simple model. **Annals of Botany**, London, v. 37, p. 919-928, 1973.
- CHARLES-EDWARDS, D.A.; THORPE, M.R. Interception of diffuse and direct-beam radiation by a hedgerow apple orchard. **Annals of Botany**, London, v. 40, p. 603-613, 1976.
- COHEN, S.; FUCHS, M. The distribution of leaf area, radiation, photosynthesis and transpiration in a shamouti orange hedgerow orchard. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdan, v. 40, p. 123-144, 1987.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em: <<http://www.conab.com.br>>. Acesso: 30 maio 2005.
- FAHL, J.I.; CARELLI, M.L.C. Influência do sombreamento nas características fisiológicas envolvidas no crescimento de espécies de coffeea. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CAFÉ ADENSADO, 1994, Londrina. **Anais...** Londrina: IAPAR, 1994. p.289-290.
- 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.
- GREEN, S.; McNAUGHTON, K.G.; WÜNSCHE, J.N.; CLOTHIER, B. Modeling light interception and transpiration of apple canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 1380-1387, 2003.
- GREEN, S.R. Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdan, v. 64, p. 201-221, 1993.

- GREEN, S.R.; GREER, D.H.; WÜNSCHE, J.N.; CASPARI, H. Measurement of light interception and utilization in an apple orchard. **Acta Horticulturae**, Nelson, v. 557, p. 369-376, 2001.
- GREEN, S.R.; McNAUGHTON, K.G.; GREER, D.H.; McLEOD, D.J. Measurement of the increased PAR and net all-wave radiation absorption by an apple tree caused by applying a reflective ground covering. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 76, p. 163-183, 1995.
- GUTIÉRREZ, M.V.; MEINZER, F.C. Energy balance and latent heat flux partitioning in coffee hedgerows at different stages of canopy development. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 68, p.173-186, 1994.
- IDSO, S.B.; BAKER, D.G.; BLAD, B.L. Relations of radiation fluxes over natural surfaces. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berkshire, v. 95, p. 244-257, 1969.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 01 maio 2005.
- JACKSON, J.E.; PALMER, J.W. Interception of light by model hedgerow orchards in relation to latitude, time of year and hedgerow configuration and orientation. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 9, p. 341-358, 1972.
- JACKSON, J.E.; PALMER, J.W. A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. **Annals of Botany**, London, v. 44, p. 381-383, mes. 1979.
- JARAMILLO-ROBLEDO, A. Aspectos microclimáticos em plantações de café (*Coffea arabica* L.) com alta densidade de sementeira. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CAFÉ ADENSADO, 1994, Londrina. **Anais...** Londrina: IAPAR, 1994. p.47-69.
- JONES, C.A.; KINIRY, J.R. *CERES-maize*: A simulation model of maize growth and development. Texas: A & M Univ. Press., 1986. 194 p.
- KOLLER, O.C. Citricultura: laranja, limão e tangerina. Porto Alegre: Rígel, 1994. 446 p.
- KRUG, C.A. A cafeicultura no mundo. Autor do livro. In: KRUG, C.A. et al. **Cultura e adubação do café**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Potassa, 1965. cap.1, p. 7-32.
- KUMAR, D.; TIESZEN, L.L. Photosynthesis in *Coffea arabica*. Effects of light and temperature. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 16, n. 1, p. 13-19, 1980.
- LANDSBERG, J.J.; BEADLE, C.C.; BISCOL, P.V.; BUTLER, D.R.; DAVIDSON, B.; INCOLL, L.D.; JAMES, G.B.; JARVIS, P.G.; MARTIN, P.J.; NEILSON, R.E.; POWELL, D.B.B.; SLACK, E.M.; THORPE, M.R.; TURNER, N.C. WARRIT, B.; WATTS, W.R. Diurnal energy, water and CO₂ exchanges in an apple (*Malus pumila*) orchard. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 12, p. 645-683, 1975.

- LEMEUR, R. A method for simulating the direct solar radiation regime in sunflower, Jerusalem artichoke, corn and soybean canopies using actual stand structure data. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 12, p. 229-247, 1973.
- MARIN, F.R. **Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado**. 2003. 118 p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- MARIN, F.R. **Evapotranspiração, transpiração e balanço de energia em pomar de lima ácida Tahiti**. 2000. 74 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. Relações entre o saldo de radiação de pomar de lima ácida Tahiti, saldo de radiação de gramado e radiação solar global. **Revista Argentina de Agrometeorologia**, Buenos Aires, v. 1, n. 1, p. 59-62, 2001.
- MARIN, F.R.; SANTIAGO, A.V., RIGHI, E.Z.; SENTELHAS, P.C.; ANGELOCCI, L.R.; MAGGIOTTO, S.R.; PEZZOPANE, J.R.M. Solar radiation interception and its relation with transpiration in different coffee canopy layers. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p.1-6, 2003.
- MATTOS JUNIOR, D. de; NEGRI, J.D. de; FIGUEIREDO, J.O. de; POMPEU JUNIOR, J. **CITROS: principais informações e recomendações de cultivo**. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/Tecnologias/citros/citros.htm>>. Acesso em: 28 abr. 2005.
- McNAUGHTON, K.G.; GREEN, S.R.; BLACK, T.A.; TYNAN, B.R.; EDWARDS, W.R.N. Direct measurement of net radiation and photosynthetically active radiation absorbed by a single plant. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 62, p. 87-107, 1992.
- MELO-ABREU, P. de; SNYDER, R.L.; RIBEIRO, A.C. Modeling radiation transmission, interception and reflection in a hedgerow apple orchard in the northeastern Portugal. **Acta Horticulturae**, Davis, v. 584, p. 73-80, 2002.
- MONTEITH, J.L.; SZEICZ, G. The radiation balance of bare soil and vegetation. **Quartely Journal of the Royal Meteorological Society**, Berkshire, v. 87, p. 159-170, 1961.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. **Symposium of Society of Experimental Biology**, v. 19, p. 205-234, 1965.
- MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics**. London: Edward Arnold Publishers, 1990. 291p.
- NKEMDIRIM, L.C. Radiative flux relations over crops. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 11, p. 229-242, 1973.
- NORMAN, J.M. Modeling the complete crop canopy. In: BARFIELD, B.J.; GERBER, J.F. **Modification of the aerial environment of plants**. St. Joseph: ASAE, 1979. cap.2, p. 249-278..

- NORMAN, J.M.; WELLES, J.M. Radiative transfer in an array of canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 481-488, 1983.
- NUTMAN, F.J. Studies of the physiology of *Coffea arabica* L. III Transpiration rates of the whole trees in relation to natural environmental conditions. **Annals of Botany**, London, v. 5, n. 17, p.59-81, 1941.
- OLIVEIRA, A.P.de; MACHADO, A.J.; ESCOBEDO, J.F. A new shadow-ring device form measuring diffuse solar radiation at surface. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, Boston, v.19, n.5, p. 698-708, may. 2002
- PALMER, J.W. Diurnal light interception and a computer model of light interception by hedgerow apple orchards. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 14, p. 601-614, 1977.
- PALMER, J.W. The effect of row orientation, tree height, time of year and latitude on light interception and distribution in model apple hedgerow canopies. **Journal of Horticultural Science**, Coventry, v. 64, n. 2, p. 137-145, 1989.
- PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; VILLA NOVA, N.A.; SENTELHAS, P.C. Estimating single tree net radiation using grass net radiation and tree leaf area. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 187-192, 2001.
- RIDAO, E.; OLIVEIRA, C.F.; CONDE, J.R.; MINGUEZ, M.I. Radiation interception and use, and spectral reflectance os contrasting canopies of autumn sown faba beans and semi-leafless peas. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 79, p. 183-203, 1996.
- RIGHI, E.Z. **Balço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. 2004. 151p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- RIOU, C.; VALANCOGNE, C.; PIERI, P. Um modèle simple d’interception du rayonnement solaire par la vigne – vérification expérimentale. **Agronomie**, Paris, v. 9, p. 441-450, 1989.
- RITCHIE, J.E. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, Washington, v. 8, n.5, p. 1204-1213, 1972.
- RÖHRIG, M.; STÜTZEL, H.; ALT, C. A three-dimensional approach to modeling light interception in heterogeneous canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, p.1024-1032, 1999.
- SENTELHAS, P.C.; NASCIMENTO, A.L.C. Variação sazonal entre o saldo de radiação e a irradiância solar global. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.18, n.1, p. 71-77, 2003.
- STANHILL, G.; HOFSTEDE, G.J.; KALMA, J.D. Radiation balance and natural agricultural vegetation. **Quartely Journal of Royal Meteorological Society**, Berkshire, v. 92, p. 128-140, 1965.

TASSARO, H. **Frutas no Brasil**. Disponível em: <<http://www.bibvirt.futuro.usp.br>>. Acesso em: 27 abr. 2005.

THOMAZIELLO, R.A. **O cultivo de cafeeiro em sistema adensado**. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br>>. Acesso em: 27 abr. 2005.

THORPE, M.R. Net radiation and transpiration of apple trees in rows. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 19, p. 41-57, 1978.

VALANCOGNE, C.; DAYAU, S.; PIERI, P.; FERREIRA, M.I.; SILVESTRE, J.; ANGELOCCI, L.R. Influence of orchard and vineyard characteristics on maximal plant transpiration. **Acta Horticulturae**, Estoril, v.537, n.1 , p. 61-68, 2000.

WANG, Y.P.; JARVIS, P.G. Description and validation of an array model – MAESTRO. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 51, p. 257-280, 1990.