

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE MESTRADO**

**AVALIAÇÃO DE PIRANÔMETROS EM CONDIÇÕES DE CAMPO
E ESTIMATIVA DO BALANÇO DE RADIAÇÃO EM ÁREA DE
GRAMÍNEA COM GRAU DE COBERTURA VARIÁVEL**

NARA TOSTA SANTOS

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
JUNHO - 2015**

**AVALIAÇÃO DE PIRANÔMETROS EM CONDIÇÕES DE CAMPO
E ESTIMATIVA DO BALANÇO DE RADIAÇÃO EM ÁREA DE
GRAMÍNEA COM GRAU DE COBERTURA VARIÁVEL**

NARA TOSTA SANTOS

Engenheira Agrônoma

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012

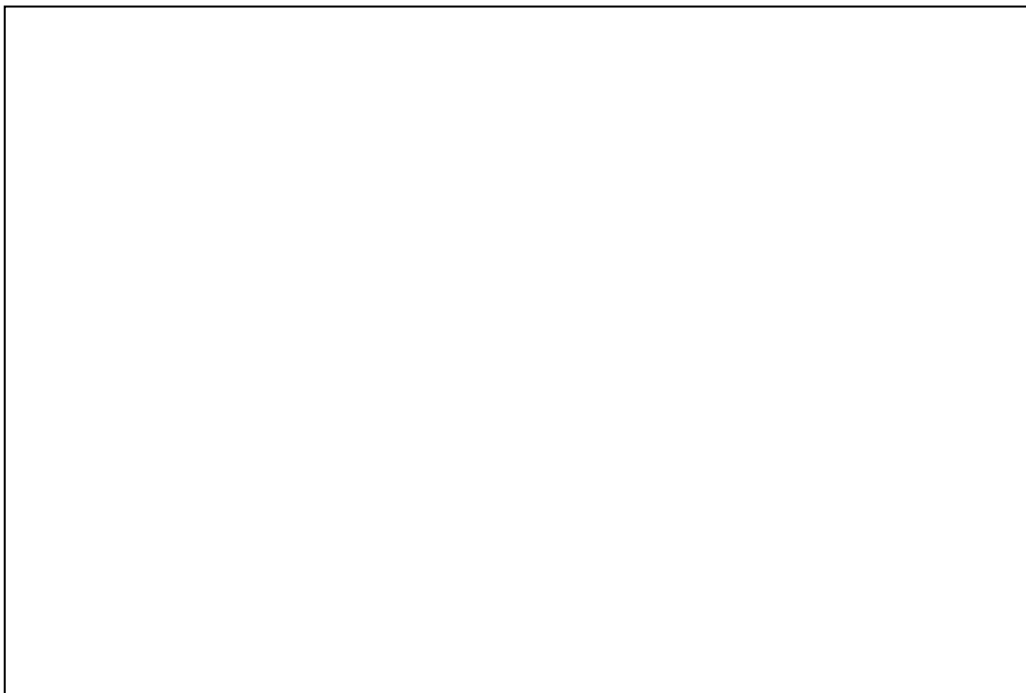
Dissertação submetida ao Colegiado de Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Agrícola, Área de Concentração: Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira

Coorientadora: Profa. Dra. Valéria Peixoto Borges

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
MESTRADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CRUZ DAS ALMAS - BAHIA – 2015**

Ficha Catalográfica



Ficha elaborada pela Biblioteca Universitária de Cruz das Almas - UFRB.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**COMISSÃO EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
NARA TOSTA SANTOS**

Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB
(Orientador)

Prof. Dr. Cristiano Tagliaferre
Universidade Estadual Sudoeste da Bahia – UESB

Profa. Dra. Greice Ximena Santos Oliveira
Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - INEMA

Dissertação homologada pelo Colegiado de Curso de Mestrado em Engenharia
Agrícola em
Conferindo o grau de Mestre em Engenharia Agrícola em:.....

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em especial a minha amada e querida filha Letícia por me proporcionar tanto amor, pelos grandes momentos ao seu lado e a compreensão das minhas ausências.

Aos meus amados pais, Arlinda e Edgard por todos os esforços que dispuseram para que eu concluísse meus estudos, pelo contínuo estímulo a realização dos meus sonhos e, principalmente, por todo amor que sentem por mim.

Ao meu namorado Jamme Bagano, pelo companheirismo e amor em todos os momentos.

À Marivanda, minha Tia, por toda dedicação, confiança e ao exemplo de pessoa digna.

Ao meu melhor amigo Edson “Marmelada” grande incentivador do meu crescimento profissional.

As minhas Tias Esmeralda & Ângela, por todo amor e pela grande torcida pela minha felicidade.

Aos meus irmãos, Lis, Renato e Lara pelo apoio nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Ao Meu Deus, por conduzir meus passos e com sua infinita Sabedoria não permitiu que desistisse desse sonho amparando-me nos momentos mais difíceis. A perseverança nos traz aprendizado.

As minhas avós, Déo & Dina pelas constantes orações.

Aos meus queridos Padrinhos, Almeida & Jaciara por toda força e incentivo,

Ao grande profissional André Caribé por me ajudar a superar todos os obstáculos.

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de crescimento profissional.

Ao Professor Aureo Oliveira pela orientação e apoio na condução do trabalho.

À Professora Valéria Borges, pela coorientação e incentivo nas horas difíceis.

Aos Professores Vital Paz, Lucas Vellame, Hans Gheyi, Francisco Adriano, Mauricio Coelho & Tales Miler pelos conselhos, oportunidades e confiança.

Aos Professores Cristiano Tagliaferre & Greice Ximena, pelas contribuições no trabalho.

A CAPES pela concessão da bolsa.

Aos meus melhores amigos Karla, Mairton & Elves pela amizade sincera, durante todos os momentos estiveram ao meu lado, por todos os conselhos e parceria incondicional durante toda minha trajetória.

Aos amigos de curso inesquecíveis Ailton, Lucylia, Murilo, Neilon, Francicleiton & Adailton pelas experiências vividas, pela convivência e apoio.

À Karol & Patrícia pelas mensagens de conforto e paz.

A todos os membros do grupo do Núcleo de Engenharia de Água e Solo (NEAS) pelo apoio e momentos de descontração.

Aos funcionários do NEAS, em especial a Mairi & Boi pelo grande incentivo e gentilezas.

Aos colegas da Fazenda Experimental do CCAAB pelo suporte nos trabalhos de campo, em especial à Alberico Santana.

Aos meus amigos queridos que torceram tanto pela minha vitória, Dedeo, Selma, Elaine, Claudinha, Michele, Poli, Cassiano, Jaqueline, Lucas & Rafaela.

Ao Sr. Mauricio Velame & Família pelo carinho e torcida.

Não foram poucos os amigos e parceiros que me incentivaram a continuar, e, dessa maneira, agradeço a todos, sem exceção. Agradeço àqueles que ajudaram de forma direta ou indireta, contribuindo para a produção desse trabalho.

*“Feliz o homem que suporta a provação com perseverança,
porque, depois de aprovado, receberá a coroa da vida que o
Senhor prometeu aos que o amam.”*

Tiago: 1:12

SUMÁRIO

Página

RESUMO

ABSTRACT

INTRODUÇÃO.....1

Capitulo 1

AVALIAÇÃO DE PIRANÔMETROS EM CONDIÇÕES DE CAMPO.....23

Capitulo 2

ESTIMATIVA DO BALANÇO DE RADIAÇÃO EM ÁREA DE GRAMÍNEA
COM GRAU DE COBERTURA VARIÁVEL.....55

Avaliação de piranômetros em condições de campo e estimativa do balanço de radiação em área de gramínea com grau de cobertura variável

Autora: Nara Tosta Santos

Orientador: Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira

Coorientadora: Profa. Dra. Valéria Peixoto Borges

RESUMO: O balanço de radiação de uma superfície é determinado por suas características, como o tipo de cobertura vegetal, albedo, temperatura, umidade dentre outras. Estudos envolvendo a radiação solar são importantes por ser a principal fonte de energia para os processos físicos e biológicos que ocorrem na biosfera, sendo de fundamental importância para os processos de fotossíntese, de aquecimento e evapotranspiração. O objetivo do trabalho foi avaliar o desempenho de diversos sensores de radiação solar incidente e estimar o saldo de radiação a partir de modelos com relações lineares. O estudo foi desenvolvido na área experimental pertencente à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, situada no município de Cruz das Almas – BA, ($12^{\circ}44'39''$ S; $39^{\circ}06'23''$ W, 225 m de altitude) no período de junho a outubro. Foram instalados diferentes modelos de piranômetros (CS300, SP-Lite, LP02, LI200X) para determinar a radiação solar incidente, cujo desempenho dos mesmos, foi realizado tomando como referência o saldo radiômetro CNR4. Simultaneamente, foi estimado o saldo de radiação por meio de modelos baseados na radiação solar incidente e o saldo de radiação de ondas curtas. Os modelos de piranômetros testados apresentaram desempenhos semelhantes ao padrão de referência (CNR4). O saldo de radiação pode ser obtido tanto em função da radiação solar incidente quanto pelo saldo de radiação de ondas curtas.

PALAVRAS CHAVES: Saldo radiômetro CNR4, radiação solar incidente, albedo.

Field evaluation of pyranometers and estimation of net radiation over grass with varying ground cover

Author: Nara Tosta Santos

Advisor: Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira

Co-Advisor: Profa. Dra. Valéria Peixoto Borges

ABSTRACT: The surface of a radiation balance is determined by characteristics such as the type of vegetation, albedo, temperature, humidity and others. Studies of solar radiation are important because it is the main source of energy for the physical and biological processes occurring in the biosphere, being of fundamental importance for the processes of photosynthesis, heating and evapotranspiration. The objective was to evaluate the performance of various solar radiation sensors and estimate the net radiation from models with linear relationships. The study was conducted in the experimental area will belonging University Federal of Recôncavo Bahia, located in Cruz das Almas - BA, (12°44'39 " S; 39°06'23 " W, 225 m) in the june to october. Different models were installed pyranometers (CS300, SP-Lite, LP02, LI200X) to determine the incident solar radiation, whose performance thereof was carried out taking as reference the balance CNR4 radiometer. Simultaneously, it estimated the net radiation using models based on the incident solar radiation and the net radiation shortwave. The pyranometers tested models showed similar performance to the benchmark (CNR4). The net radiation can be obtained both as a function of incident solar radiation as the radiation balance of shortwave.

KEY-WORDS: Net radiometer, global solar radiation, albedo.

INTRODUÇÃO

O estudo da radiação solar é de fundamental importância, pois interfere no estudo de outros elementos meteorológicos como a evaporação, evapotranspiração, temperatura do ar, umidade relativa e outros. A radiação sofre variação tanto sazonal, como interanual. Sazonalmente, sua variação está intimamente ligada pela latitude local, sendo também influenciada pelas características da atmosfera, que governam sua transmissividade até chegar à superfície da Terra, bem como, pelas características do solo, que governa o seu grau de refletividade (CÂMARA et al., 2010).

Ao entrar na atmosfera a radiação solar é atenuada. Sua intensidade é modificada por três processos físicos: reflexão, absorção por gases atmosféricos e espalhamento ou difusão, causado por moléculas de gases, vapor d'água, poeira, e outras partículas de aerossóis. Ao atingir a superfície terrestre recebe o nome de radiação solar incidente (IQBAL, 1983).

Os processos físicos regentes na superfície próximos a atmosfera, tais como evaporação da água, aquecimento do ar e do solo e entre outros são dependentes da quantidade de energia disponível no meio. Essa quantidade de energia denomina-se de saldo de radiação. Essa variável é essencial em estudos do balanço de energia (BASTIAANSEN et al., 2005; BISHT et al., 2005; ALLEN et al., 2007; ANDERSON et al., 2012; SILVA et al., 2012a), sendo de grande importância no monitoramento do clima, previsão de tempo, modelagem hidrológica e meteorologia agrícola.

Para estudos de perda d'água para atmosfera em solos vegetados e comportamento de vários elementos meteorológicos, torna-se indispensável o conhecimento do balanço de radiação e suas variações, sendo necessárias

medidas da radiação solar incidente, da absorção dessa radiação de ondas curtas, da emissão da superfície e da atmosfera (SANTOS et al., 2008).

O saldo de radiação pode ser medido por meio de saldos radiômetros, que não são usualmente empregados em estações meteorológicas convencionais e automatizadas, uma vez que têm custo elevado e suas medições não possibilitam pesquisas com resultados em escala regional (MARQUES et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2015).

Assim, vários autores recorreram a dados de radiação solar incidente e ao saldo de radiação de onda curta para estimar o saldo de radiação (ALADOS et al., 2003; PEZZOPANE et al., 2005; FIETZ & FISCH 2009; HELDWEIN et al., 2012ab; LIMA et al., 2014), o que torna sua determinação mais simples e, principalmente, aplicável em sistemas operacionais, nos quais conta-se apenas com medições das estações automáticas instaladas em condições padronizadas.

Hipóteses

Não há diferenças no desempenho da radiação solar incidente medida por diferentes modelos de piranômetros.

Não há diferença na performance de modelos para estimativa da radiação líquida, quando se utiliza o modelo com base na radiação solar incidente, e no modelo com base no balanço de ondas curtas na superfície.

REVISÃO DE LITERATURA

A radiação solar incidente é a força motriz para muitos processos físico-químicos e biológicos que ocorrem no sistema superfície-atmosfera, constituindo-se em importante variável meteorológica. As suas variações alteram a temperatura e a circulação atmosférica e permitem estudos relacionados à necessidade hídrica de culturas irrigadas, modelagem do crescimento e produção vegetal, mudança climáticas, entre outros (PEREIRA et al., 2007; SOUZA et al., 2008; BORGES et al., 2010).

Trabalhos de pesquisa por meio dos quais pode-se determinar a radiação solar incidente disponível à superfície da Terra são plenamente justificados, dada a importância desse elemento em diversas áreas do conhecimento

humano, pois permite caracterizar o clima de uma região, e está diretamente ligada aos fenômenos meteorológicos e aos componentes atmosféricos, tais como vapor d'água e gases, possui grande importância nos estudos agrônômicos como no manejo dos recursos hídricos, nos modelos de crescimento de plantas, na estimativa da evapotranspiração e em projetos de sistemas de irrigação (DANTAS et al., 2003; ALMOROX et al., 2011; FRUTEIRA et al., 2011; SILVA et al., 2012b).

A intensidade de radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre é variável ao longo do ano, em virtude dos efeitos astronômicos. Ademais, a quantidade de radiação emitida pelo Sol é função do comprimento de onda e de fenômenos que ocorrem na própria fonte de energia (manchas solares, erupções solares, variações de temperatura etc.). Assim, a quantidade de radiação solar que chega à superfície da Terra dependerá de todos esses fatores, além de outros associados à atmosfera terrestre; trata-se, portanto, de um problema de complexa análise (MARTINS et al., 2004).

Segundo Ferreira (2006), a densidade de fluxo solar recebida na superfície da Terra é menor do que a densidade de fluxo recebido no topo da atmosfera, pois a radiação solar, ao penetrar na atmosfera é atenuada pelos processos de espalhamento e de absorção. Dentre os componentes da atmosfera, a cobertura de nuvens é o principal agente nos processos de absorção e espalhamento da luz solar seguido pelos gases e aerossóis. As nuvens reduzem a quantidade de energia solar absorvida no sistema Terra-Atmosfera, tendo em vista que a refletividade das mesmas é bem maior do que a refletividade da atmosfera sem nuvens e com isso há uma maior ou menor transmissão radiativa (QUERINO et al., 2011).

A presença de vapor d'água e aerossóis em suspensão na atmosfera terrestre, assim como a variação da temperatura pode alterar o espectro da radiação solar que chega à superfície terrestre. A radiação absorvida por eles é normalmente emitida de volta em direção à superfície terrestre. Assim, o balanço de energia na atmosfera assegura o aquecimento terrestre, mantendo a temperatura média do planeta e permitindo a existência de vida nas formas que hoje são conhecidas (FERREIRA, 2006).

É importante notar que a quantidade de absorção ou espalhamento do fluxo radiativo depende, sobretudo da espessura da camada atmosférica percorrida pela irradiação. Portanto, entende-se que a intensidade da radiação solar para uma localidade na superfície da Terra está relacionada não somente aos constituintes da atmosfera, como também à altitude e ao ângulo zenital do Sol (GUIMARÃES, 2003).

De acordo com Drechmer (2006), a radiação solar incidente sobre uma superfície, interagindo com a atmosfera em seu caminho, possui uma componente direta, correspondendo aos fótons provenientes diretamente do feixe solar paralelos, e uma componente difusa, sendo esta constituída pelos fótons que sofreram espalhamentos resultantes da interação com gases e partículas existentes na atmosfera e foram redirecionados para a superfície terrestre. A soma dessas duas componentes é denominada de radiação solar global incidente. Sendo que, a proporção de cada componente depende das condições atmosféricas do momento e do ângulo zenital.

Segundo Victoria (2008), um dos problemas na obtenção de dados medidos de radiação solar incidente é a quantidade reduzida do número de estações meteorológicas existentes e da grande extensão territorial do Brasil. Para localidades com ausência de coleta de dados de radiação solar, valores estimados podem ser obtidos empregando-se relações empíricas por meio de modelos de estimativa que utilizem outros elementos meteorológicos disponíveis.

É importante ressaltar que os modelos são, em geral, restritos às condições para as quais foram desenvolvidos, apresentando problemas de transferabilidade, quando não devidamente calibrados. É substancialmente grande o número de trabalhos científicos que se dedicam a produzir estimativas de radiação solar incidente, devido à falta de disponibilidade de dados medidos (DANTAS et al., 2003; BORGES et al., 2010; BURIOL et al., 2012; SILVA et al., 2012b; BELÚCIO et al., 2014).

Segundo Fornari et al. (2012), o homem sempre buscou uma maneira de quantificar as grandezas ambientais com o objetivo de sobrevivência, seja para conseguir vantagens em batalhas, para conseguir abrigo durante tempestades e catástrofes ou para aplicação na agricultura; o interesse em monitorar as

variáveis climáticas remonta à antiguidade. Sobretudo medidas de radiação solar cuja aplicação é ampla e seu interesse técnico-científico vêm sendo estimulado com o desenvolvimento de dispositivos denominados sensores, capazes de fornecerem medidas sobre grandezas físicas (WMO, 2008).

Segundo Bastos (2002), sensores são dispositivos que variam suas propriedades sob a ação de uma grandeza física, fornecendo um sinal que indica essa grandeza, ou seja, um sensor é um dispositivo que recebe e responde a um sinal ou estímulo, que pode ser definido como uma quantidade, propriedade ou condição que é percebida e convertida em um sinal elétrico (FRADEN, 2004).

A forma mais precisa para quantificar a radiação solar incidente na superfície é sua medida direta, por meio de um instrumento denominado piranômetro, podendo ser determinada utilizando tanto na horizontal como também em superfícies inclinadas ou mesmo voltado para baixo para medir radiação solar refletida ou utilizando-se um disco sombreador para encobrir a radiação direta obtendo a radiação difusa (SOUZA & ESCOBEDO, 2013).

Existem muitos modelos de piranômetros comerciais e estes são divididos em dois tipos quanto a sua construção: piranômetros térmicos (à base de termopares) e piranômetros fotovoltaicos (à base de silício) e em três categorias quanto à precisão: padrão secundário; 1ª classe e 2ª classe, conforme a ISO 9060 (1990).

Os piranômetros térmicos são mais precisos e tomados como padrão para as calibrações, fornecem dados de radiação de boa qualidade, com baixas incertezas, visto que medem a radiação solar incidente em praticamente todo o seu espectro, de 300 nm a pouco mais de 3000 nm, possuem boa resposta cosseno e, alguns, possuem circuitos de compensação de temperatura. Esses instrumentos apresentam resultados estáveis e com boa repetitividade fazendo com que a (WMO) os considerem instrumentos de segunda classe. Entretanto, apresentam um custo elevado de aquisição e de manutenção ao longo do seu funcionamento se comparado com o do piranômetro fotovoltaico (FREIRE, 2008).

De acordo com Fornari et al. (2012), em um experimento de monitoramento ambiental visando o estudo da radiação solar incidente em

função das variáveis ambientais com o objetivo principal testar radiômetros, concluíram que os sensores baseados em termopilha possuem uma resposta aproximadamente plana e muito mais ampla, cobrindo grande parte do infravermelho. Já as células solares de silício e sensores fotovoltaicos possuem uma resposta basicamente no visível e infravermelho próximo, pois toda a alteração que o espectro sofre devido à umidade e temperatura para comprimentos de onda maiores do que 1100 nm acabam passando despercebidos, causando uma diferença de valores de radiação solar incidente medido ou da eficiência da célula.

Os autores acrescentam ainda, que a incerteza de piranômetros fotovoltaicos é maior se comparada a radiômetros de termopilhas, devido à limitação espectral. Eles possuem um custo muito menor do que os piranômetros que utilizam termopilhas que são importados. Este trabalho possibilitou obter fatores de correção para piranômetros fotovoltaicos, em função das variáveis ambientais, que possibilita melhorar a sua qualidade. A simulação foi feita para um céu limpo e sem nuvens, já que a presença de nuvens possui uma forte influência no fluxo de radiação que atinge a superfície da Terra. A variação máxima estimada para medidas de radiação incidente utilizando um radiômetro fotovoltaico, considerando uma calibração a temperatura do ar de 25°C e umidade relativa de 50%, ocorre para os maiores valores de umidade calculados e varia entre -0,9% e 2,6%. Já para um radiômetro baseado em termopilha, nas mesmas condições de calibração, a variação fica entre -0,12% e 0,25% (FORNARI et al., 2012),

O custo elevado dos piranômetros termoelétricos, de primeira e de segunda classe, tem promovido o interesse pelo desenvolvimento e a utilização de instrumentos com sensores fotovoltaicos, os quais possuem custo bastante reduzido. Freire (2008) desenvolveu um piranômetro utilizando um sensor fotovoltaico de baixo custo e os resultados obtidos foi que protótipo-1 poderia ser classificado na categoria 2ª classe no que se refere a não-linearidade de acordo com a ISO 9060. Embora a norma ISO 9060 mencione os piranômetros fotovoltaicos como um dos tipos de solarímetros existentes, a mesma não permite classificar esses instrumentos em nenhuma categoria devido às exigências da norma com relação à resposta espectral.

Vilela (2010) também desenvolveu sensores com células solares de silício monocristalino para aplicações como elemento sensor de radiação solar cujo objetivo do trabalho foi alcançado com excelentes resultados, podendo servir de ponto de partida para desenvolvimento de outros dispositivos semicondutores para uso como sensores, como por exemplo, elementos sensores para medida de ultravioleta.

Elementos sensores fotovoltaicos possuem como maior limitação a não uniformidade da resposta espectral além de só possuir resposta em uma faixa mais restrita do espectro solar, quando comparado com a termopilha. Devido a esta limitação e não uniformidade, de acordo com Tiba et al. (2000) um radiômetro que utiliza uma célula solar está sujeito a um erro nas medidas de até 3% quando comparado com um radiômetro que utiliza uma termopilha. Portanto, quando se considera somente a energia total incidente ao longo de um dia, este erro pode diminuir para menos de 1%.

Segundo Vilela (2010), entre as grandes vantagens de um sensor fotovoltaico é o seu baixo preço, sua resposta quase instantânea faz com que esses instrumentos sejam particularmente úteis para aplicações em uma rede solarimétrica de baixo custo como piranômetros secundários, para interpolar estações que utilizam piranômetros termoelétricos ou para a detecção de rápidas flutuações, com respostas quase instantâneas na radiação solar e baixa degradação da constante de calibração. Um sensor fotovoltaico tem um custo muito menor do que um sensor que utiliza termopilha e ainda possui um tempo de resposta de aproximadamente 1 ms, enquanto que uma termopilha possui um tempo de resposta de aproximadamente 15 s (TIBA et al., 2000; GROSSI, 2002).

Os piranômetros fotoelétricos vêm calibrados por piranômetros termoelétricos para se determinar o fator de calibração e a dependência deste às condições ambientais, tais como: temperatura, nível de radiação, distribuição espectral de radiação, variação temporal, distribuição angular de radiação, inclinação do instrumento, etc. Conforme pressuposições de Guimarães et al. (2011), para um piranômetro espera-se uma resposta linear às variações do nível de radiação e que seja insensível às variações nos parâmetros ambientais, embora alguns desvios sejam comuns, pois por melhor

que seja o instrumento utilizado para medir uma grandeza física, naturalmente o valor medido não será igual ao valor real da grandeza, pois todo processo de medida introduz erros.

Os diferentes tipos de erros podem ser classificados como erros sistemáticos e erros aleatórios. O erro sistemático é sempre constante para todas as medidas e a diferença do valor lido para o valor verdadeiro da medida é sempre a mesma. Os erros estatísticos se distribuem aleatoriamente em torno do valor verdadeiro da medida.

Os erros estatísticos resultam de variações aleatórias do valor medido, devido a fatores que não podem ser controlados. Em geral, estes erros se devem somente ao processo de medida, mas em certos casos estes erros são intrínsecos ao próprio mensurando (VUOLO, 1998).

De acordo com Vilela (2010), a medida da radiação solar incidente na superfície da Terra possui inúmeros erros aleatórios intrínsecos, tais como erros devido a mudanças atmosféricas, nebulosidade, turbidez, variação da densidade da camada de ar que está sobre o radiômetro por causa da temperatura, atividades solares, ou mesmo sombras transitórias devido à passagem de pássaros ou sujeiras sobre o radiômetro. Vale ressaltar que além de erros citados ao mensurando, existem os erros aleatórios intrínsecos do próprio sistema de medida, como ruídos térmicos, eletromagnéticos e outros.

Outro fator que contribui para o aumento da incerteza da medida de radiação solar incidente é a sensibilidade do sensor. A absorção de radiação solar que incide na superfície terrestre muda constantemente com o ângulo de incidência ao longo do dia e para sensores fotoelétricos dotados de silício, essa sensibilidade cai bruscamente para ângulos de incidência altos, não obedecendo à lei dos cossenos (VICTORIA, 2008).

Saldo de radiação

O saldo de radiação (R_n) representa a energia líquida disponível na superfície exercendo um papel fundamental, pois influência nos processos físicos regentes na superfície próximos a atmosfera, tais como evaporação da água, aquecimento do ar e do solo e entre outros (FIETZ & FISCH, 2009; OCAMPO & RIVAS, 2013).

O conhecimento desses processos é muito importante dada sua forte influência no ciclo hidrológico o que proporciona alterações relevantes no regime climático como também no entendimento do aquecimento e resfriamento do ar e do solo, pelo metabolismo das plantas e dos animais e na transferência de vapor d'água da superfície para atmosfera, bem como é necessário para o planejamento de atividades agrícolas irrigadas com a utilização racional dos recursos hídricos (BATISTA et al., 2013). Uma melhor quantificação de R_n permitiria, por exemplo, um melhor dimensionamento da irrigação de culturas, minimizando desperdícios e mantendo o solo em uma faixa de umidade adequada às plantas (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Observa-se que o R_n representa a soma algébrica de todos os fluxos de entrada e saída, sendo os fluxos de radiação incidente na superfície terrestre absorvida menos a radiação refletida, representado pelo balanço de radiação de ondas curtas (R_{ns}) mais os fluxos da radiação emitida pela superfície, menos a radiação termal absorvida pela superfície, representado pelo balanço de radiação de ondas longas (R_{nl}) (MARTINS, 2012).

Segundo Allen et al. (1998), o R_n é função dos valores de todos esses fluxos, e em geral é positivo durante o dia (representando uma entrada maior do que a saída de energia, com o aquecimento do sistema solo-planta-atmosfera) e negativo à noite, devido à ausência do sol, exceto em condições extremas, em altas latitudes. Esse é um modo da superfície eliminar parte da energia solar absorvida e que se transformou em calor sensível (SENTELHAS & NASCIMENTO, 2003).

Em superfícies vegetadas, a quantificação do R_n é de suma importância, principalmente para o dimensionamento do balanço de energia e, desta forma, para a estimativa da demanda hídrica real da cultura. A maioria, dos modelos de evapotranspiração requer o saldo de radiação como parâmetro de entrada fundamental, sendo sua estimativa precisa essencial para o manejo dos recursos hídricos em escala regional. De maneira geral, não havendo restrição hídrica, quanto maior a disponibilidade de energia solar (R_s) e conseqüentemente do R_n , maior também será a evapotranspiração (SILVA et al., 2005; FIETZ & FISCH, 2009).

A magnitude de R_n está diretamente associada à intensidade de radiação solar que atinge à superfície, variando em função da latitude, estação do ano e transparência atmosférica. Outros fatores que condicionam a intensidade de R_n são as propriedades óticas da superfície - reflexão e emissividade. Estas propriedades, principalmente a reflexão, variam em resposta as mudanças de fração de cobertura do solo, da umidade, do arranjo foliar, do ângulo de incidência dos raios solares, do tipo e da quantidade de R_s . O albedo desempenha um papel fundamental nas condições microclimáticas locais, uma vez que, este índice é específico para cada tipo de superfície, pois influencia diretamente a energia disponível na interface superfície-atmosfera para os processos de aquecimento, evapotranspiração e fotossíntese (CHIA, 1967; KALMA & BADHAM, 1972; WANG et al., 2007).

No início da fase de crescimento da cultura, quando maior parte do solo está exposta diretamente à radiação solar, o albedo é determinado, principalmente, pelas características óticas das partículas do solo, de sua estrutura e do conteúdo de água da superfície. No entanto, próximo ao fim desta fase, o albedo é principalmente determinado pela condição das folhas e estrutura de cultivo (JACOBS & VAN PUL, 1990).

A diferença diária do albedo para superfícies vegetadas está relacionada com o ângulo zenital que apresenta valores máximos no nascer e pôr do sol e valor mínimo ao meio dia. O albedo atinge menor valor ao meio dia com ângulo zenital menor devido ao menor caminho óptico que o raio percorre nesse horário, permitindo que a radiação chegue à superfície sem sofrer tanta interferência em sua componente, com uma maior penetração da radiação no dossel vegetativo. Enquanto que o albedo atinge o maior valor nas primeiras e últimas horas do dia, com ângulo zenital maior resultando em uma penetração da radiação solar menor no interior do dossel, havendo redução da absorção por espalhamento múltiplo, o que provoca uma maior reflexão da superfície (QUERINO et al., 2006).

A determinação da medida direta do R_n pode ser realizada por meio de instrumentos denominados saldo radiômetro, que possuem sensores tanto para ondas curtas como para ondas longas e já fornecem valores calculados dos

saldos energéticos (saldo de ondas curtas, ondas longas e saldo de radiação total) (BLONQUIST JÚNIOR et al., 2009).

Este instrumento não é usualmente empregado em estações meteorológicas, é usado quase que exclusivamente para pesquisas, pois possibilitam medições que representam as condições locais e a sua espacialização tem elevado custo de aquisição e dificuldades de manutenção, ou seja, considerando uma região com ampla extensão territorial, a instalação, calibração e manutenção de uma ampla rede de estações tornam-se financeiramente onerosas (DI PACE et al., 2008; GOMES et al., 2009; ENORÉ, 2012).

Com maior frequência são realizadas medições de R_n em estudos destinados a obtenção das componentes do balanço de energia. Observa-se que nas estações meteorológicas é pouco comum uso desses instrumentos devido aos custos elevados de aquisição e manutenção para uso rotineiro e a não representatividade dos dados na área estudada. De acordo com Sentelhas & Gillespie (2008), em virtude dessas limitações, poucos dados históricos de R_n são disponíveis na maioria das redes de estações padrões, sendo frequentemente estimado por diversas maneiras com base em formulações empíricas que utilizam elementos meteorológicos de superfície.

É substancialmente grande o número de trabalhos científicos que se dedicam a produzir estimativas de R_n baseadas no uso da técnica do sensoriamento remoto em medições realizadas por sensores orbitais, principalmente na determinação sobre áreas heterogêneas e em escala regional, as imagens de satélite constituem uma alternativa de baixo custo e grande cobertura espacial (SILVA et al., 2005; BISHT et al., 2005; DI PACE et al., 2008; BEZERRA et al., 2008; GOMES et al., 2009).

Existem trabalhos científicos que também utilizam-se de modelos empíricos ou semi-empíricos para estimar R_n , visto como alternativa para suprir a falta de informações desta variável. Nos modelos semi-empíricos, R_n é geralmente obtido através da estimativa do R_{ns} e o R_{nl} separadamente.

Entretanto, como nem sempre é possível à medição de todos os componentes do balanço de radiação necessários à obtenção do saldo de radiação, a estimativa do R_{nl} é complexa, geralmente obtida pela estimativa dos

seus dois componentes separadamente, mediante a lei de Stefan-Boltzman com o conhecimento da emissividade (ALLEN et al., 1998; SANTOS et al., 2008). Já a estimativa do R_{ns} é relativamente simples, uma vez que são requeridos apenas dados de R_s e albedo, que são relativamente fáceis de serem obtidos em diversas estações meteorológicas.

Desta forma, o fato dos componentes de radiação solar serem mais freqüentemente medidos que o saldo de radiação e em virtude da complexidade da estimativa do R_{nl} , diversos estudos têm investigado metodologias para estimar R_n em culturas agrícolas e tipos de vegetação por meio de relações lineares com R_s e R_{ns} (KUSTAS et al., 1994; ALADOS et al., 2003; SENTELHAS & NASCIMENTO 2003; KJAERGAARD et al., 2007; SILVA et al., 2007; FIETZ & FISCH 2009; HELDWEIN et al., 2012ab; LIMA et al., 2014). O que torna a determinação de R_n mais simples e, principalmente, aplicável em sistemas operacionais, nos quais conta-se apenas com medições das estações automáticas instaladas em condições padronizadas.

Kjaersgaard et al. (2007) obtiveram R_n com base em dados de R_s e de outras variáveis meteorológicas. Nesse estudo, a estimativa diária do saldo de radiação foi realizada utilizando regressão linear simples (função apenas de R_s) e múltipla (função de R_s , temperaturas máxima e mínima e distância média relativa Terra-Sol) e modelos empíricos acoplados com a relação física de Stefan-Boltzmann (SOUZA & SILVA, 2005; SOUZA et al., 2008).

Fietz & Fisch (2009) avaliando modelos de estimativa do saldo de radiação na região de Dourados, concluíram que os modelos que utilizaram a radiação solar incidente na estimativa do saldo de radiação tiveram desempenhos similares, classificados como ótimo. Por sua maior praticidade, a equação que utiliza apenas a radiação solar incidente como variável independente é mais recomendada para ser utilizada na estimativa do saldo de radiação.

Azevedo et al. (1997) concluíram, em estudos de balanço de energia e estimativa de evapotranspiração potencial da cultura da videira, na região de Petrolina (PE), que é possível estimar a radiação líquida em função apenas da radiação solar global incidente com excelente precisão.

Heldwein et al. (2012a), analisando a relação do R_n com a R_s em dosséis de batata em Santa Maria-RS, encontraram que os menores valores de R_s no outono ocorrem devido ao fato que, no hemisfério sul, o fotoperíodo decresce e o ângulo zenital dos raios solares aumenta gradativamente, à medida que se aproxima o solstício de inverno. Dependendo da precisão exigida, a estimativa de R_n pode ser utilizado um modelo geral único, independente da condição de umidade na camada superficial do solo, da época do ano e do genótipo utilizado.

Sentelhas & Nascimento (2003) estabeleceram a variação sazonal da relação entre R_n em uma superfície padrão (gramada) e R_s considerando-se tanto os valores diurnos como os diários, para Piracicaba, SP, e testaram essas relações como método de estimativa de tais variáveis. Observaram que a relação entre R_n diária e R_s variou consideravelmente ao longo do ano, de 0,473 no inverno a 0,595 no verão, indicando o efeito tanto da nebulosidade como o coeficiente de reflexão da superfície.

Estudando a relação entre R_n/R_s em grama batatais e capim tanzânia em Piracicaba-SP, Silva et al. (2007) encontraram coeficientes angulares de 0,54 e 0,53, respectivamente, ou seja, ocorreram perdas por processos de radiação de 36 e 37%. Heldwein et al. (2012b), estudando essa mesma relação em girassol, encontraram coeficientes angulares de 0,53. Já Fietz & Fisch (2009), estudando a relação entre R_n e R_s em Dourados-MS, encontraram coeficientes angulares de 0,435.

Quando a estimativa do saldo de radiação foi realizada com base no saldo de radiação de onda curta, Alados et al. (2003) mostraram que a inclusão do albedo da superfície na parametrização apresenta leve melhoria na estimativa do saldo de radiação total. A variabilidade espacial dos coeficientes tornam estas relações aplicáveis apenas a regiões com as mesmas características climáticas e geográficas. A alta correlação observada entre o saldo de onda curta e o saldo de radiação aumenta a confiabilidade deste tipo de aproximação e mostra a importância das componentes solares na estimativa de R_n (MURTAGH, 1976).

Zanetti et al. (2006), com interesse de utilizar dados mais facilmente disponíveis para métodos de estimativa, propuseram equações de estimativa

da radiação líquida diária de gramado, em função das temperaturas máximas e mínimas do ar e de radiação solar global para Campos de Goytacazes/RJ e Viçosa/MG, obtendo valores de coeficientes de determinação (r^2) entre 0,7217 e 0,9802 em Goytacazes, e 0,8806 e 0,9517 em Viçosa, para radiação líquida, quando os valores estimados foram testados através da radiação líquida calculada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALADOS, I.; FOYO MORENO, I.; OLMO, F. J.; ALADOS ARBOLEDAS, L. Relationship between net radiation and solar radiation for semi-arid shrub-land. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 116, n. 3, p. 221-227. 2003.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. Roma: **FAO Irrigation and Drainage Paper**, n. 56. Rome, 300 p. 1998.

ALLEN, R. G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 122, n. 2, p. 97-106, 1996.

ALMOROX, J.; HONTORIA, C.; BENITO, M. Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain). **Applied Energy**, London, v. 88, n. 5, p. 1703-1709, 2011.

ANDERSON, M. C.; ALLEN, R. G., MORSE, A.; KUSTAS, W. P. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, n. 1, p. 50-65, 2012.

AZEVEDO, P. V.; TEIXEIRA, A. H. C.; SILVA, B. B.; SOARES, J. M.; SARAIVA, F. A. M. Avaliação da reflectância e do saldo de radiação sobre um cultivo de videira europeia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 1-7, 1997.

BASTIAANSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 1, p. 85-89, 2005.

BASTOS, A. Instrumentação, Eletrônica Analógica e Digital. Rio de Janeiro RJ, 360 p. 2002.

BATISTA, W. R. M.; AGUIAR NETO, A. O.; SOUSA, I. F.; VASCO, A. N. Determinação do balanço de radiação com auxílio de imagens orbitais na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré Sergipe, **Scientia Plena**, v. 9, n. 4, p. 1-10, 2013.

BELÚCIO, L. P.; SILVA, A. N.; SOUZA, L. R.; MOURA, G. B. A. Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 494-504. 2014.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.

BISHT, G.; VENTURINI, V.; ISLAM, S.; JIANG, L. E. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, n. 1, p. 562-567, 2005.

BLONQUIST JÚNIOR, J. M.; TANNER, B. D.; BUGBEE, B. Evaluation of measurement accuracy and comparison of two new and three traditional net radiometers. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 10, p. 1709-1721, 2009.

BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO FILHO, M. A.; SILVA, T. S. M.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 74-80, 2010.

BURIOL, G. A.; ESTEFANEL, V.; HELDWEIN, A. B.; PRESTES, S.D.; HORN, J. F. C. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria - RS. **Ciência Rural**, v. 42, n. 9, p. 1563-1567, 2012.

CÂMARA, R. K. C.; COSTA, A. C. L.; SOUSA, A. J. S. Variabilidade da Radiação Solar na Floresta Nacional de Caxiuanã-PA. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém - PA. **Anais...** Belém, 2010.

CHIA, L.-S. Albedo of natural surfaces in Barbados. **Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society**, v. 93, n. 395, p. 116-120, 1967.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG. **Ciência & Agrotecnologia**, v. 27, n. 6, p. 1260-1263, 2003.

DRECHMER, P. A. O.; RICIERI, R. P. Irradiação global, direta e difusa, para a região de Cascavel, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Technology**, v. 28, n. 1, p. 73-77, 2006.

DI PACE, F. T.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R.; SILVA, S. T. A. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 4, p.385-392, 2008.

ENORÉ, D. P. **Estudos de saldos de radiação a superfície estimados por satélites**. 116f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2012.

FERREIRA, W. P. M. **Radiação solar em Sete Lagoas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo**, 2006. 21 p. (Documentos/Embrapa Milho e Sorgo, 58).

FIETZ, C. R.; FISCH, G. F. Avaliação de modelos de estimativa do saldo de radiação e do método de Priestley-Taylor para a região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 449 - 453, 2009.

FORNARI, C. I.; BELOTO, A. F.; VILELA, W. A.; BERNI, L. A. Unidade de monitoramento ambiental visando o estudo da irradiância solar em função da temperatura e umidade. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR E V CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DA ISES, 2012, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 2012.

FRADEN J. **Handbook of modern sensors**. 3.ed., [S.l.], Springer, 2004.

FREIRE, L. A. D. **Desenvolvimento de um piranômetro fotovoltaico**. 75f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

FRUTEIRA, R. S.; LEITE, M. L.; VIRGENS FILHO, J. S. Desempenho do modelo PGECLIMA_R na simulação de séries diárias sintéticas de radiação solar global para diferentes localidades do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 9, n. 9, p. 35-47, 2011.

GOMES, H. B.; SILVA, B. B.; CAVALCANTI, E. P.; ROCHA, H. R. Balanço de radiação em diferentes biomas no estado de São Paulo mediante imagens Landsat. **Revista Geociências**, v. 28, n. 2, p.153-164, 2009.

GROSSI, H. G. **Notas sobre radiación solar**. Universidad Nacional de Luján, Departamento de Ciencias Básicas. (ISBN 987-9285-19-0), Argentina, 2002.

GUIMARÃES, P.; SANTANA, M. A. A.; VILELA, W. A.; BERNI, L. A.; SILVA, L.; PAES, T. F. Avaliação da utilização de um simulador solar para calibração indoor de piranômetros. In: VIII Congresso Brasileiro de Metrologia, 2011, Natal - RN. **Anais...** Natal, 2011.

GUIMARÃES, A. P. C. **Estimativa de Parâmetros da Camada Atmosférica para Cálculo da Irradiação Solar Incidente na Superfície Terrestre**. 162f.

Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2003.

HELDWEIN, A. B.; MALDANER, I. C.; BOSCO, L. C.; TRENTIN, G.; GRIMM, E. L.; RADONS, S. Z.; LUCAS, D. D. P. Saldo de radiação diurno em dosséis de batata como função da radiação solar global. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 1, p. 96-104, 2012a.

HELDWEIN, A. B.; MALDANER, I. C.; RADONS, S. Z.; LOOSE, L. H.; LUCAS, D. D. P.; HINNAH, F. D. Estimativa do saldo de radiação em girassol como função da radiação solar global. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 194-199, 2012b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 9060. Genebra, 1990.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Ed. AP. Vancouver Canadá, 1983. 389 p.

JACOBS, A. F. G.; VAN PUL, W. A. J. Seasonal changes in the albedo of a maize crop during two seasons. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 49, n. 4, p. 351-360, 1990.

KALMA, J. D.; BADHAM, R. The radiation balance of a tropical pasture, I. The reflection of short - wave radiation. **Agricultural Meteorology**, v. 10, p. 251-259, 1972.

KJAERGAARD, J. H.; CUENCA, R. H.; PLAUBORG, F. L. Long-term comparisons of net radiation calculation schemes. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 123, n. 3 p. 417-431, 2007.

KUSTAS, W.P.; PINKER, R.T.; SCHMUGGER, T.J.; HUMES, K.S. Net radiation estimated for semiarid rangeland basin sensed date. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 71, n. 3, p. 337-357, 1994.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S.; LIRA, C. A. B. O.; BORGES JÚNIOR, J. C. F.; SILVA, B. B. Saldo de radiação em caupi e

mamona nos municípios de Areia-PB e Garanhuns-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 1, p. 93-102, 2014.

MARQUES, D. D.; BRITO, A. U.; CUNHA, A. C.; SOUZA, L. R. Variação da radiação solar no estado do Amapá: Estudo de caso em Macapá, Pacuí, Serra do Navio e Oiapoque no período de 2006 a 2008. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, p. 127-138, 2012.

MARTINS, A. L. **Relação entre o balanço de ondas longas e o efeito estufa em área de pastagem com fragmentos de cerrado**. 63f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá - MT, 2012.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário- o Projeto Swera. **Revista Brasileira Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145-159, 2004.

MURTAGH, G. J. Relations between net radiation, global solar radiation, and sunshine on the north coast of new south wales. **Australian Meteorological Magazine**, v. 24, n. 3, p. 111-114, 1976.

OCAMPO, D.; RIVAS, R. Estimating daily net radiation from multiple linear regression models. **Revista Chapingo**, v. 9, n. 2, p. 263-272, 2013.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; MOURA, A. E. S. S. Balanço de radiação por sensoriamento remoto em bacia hidrográfica da zona da mata nordestina. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p.16-28, 2015.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. Ed. Revista e Ampliada, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - SP. 2007. 202 p.

PEZZOPANE, J. R. M.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; GALLO, P. B. Radiação solar e saldo de radiação em cultivo de café a pleno sol e consorciado com banana “prata ana”. **Bragantia**, v. 64, n. 3, p. 485-497, 2005.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; QUERINO, J. K. A. S.; VON RADOW, C. V.; MARQUES FILHO, A. O. Estudo da radiação solar global e do índice de transmissividade (K_t), externo e interno, em uma floresta de mangue em Alagoas – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 204-294, 2011.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; MARIANO, G. L. Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zênital na Região Amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 42-49, 2006.

SANTOS, M. A.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; SANTOS, M. J.; FERREIRA JUNIOR, R. A. Balanço de radiação em cana-de-açúcar na região de Tabuleiro Costeiro de Alagoas. In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2008, São Paulo – SP. **Anais...** São Paulo, 2008.

SENTELHAS, P.C.; GILLESPIE, T.J. Estimating hourly net radiation for leaf wetness duration using the Penman - Monteith equation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 91, n. 4, p. 205-215, 2008.

SENTELHAS, P. C.; NASCIMENTO, A. L. C. Variação sazonal da relação entre o saldo de radiação e a irradiância solar global. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 18, n. 1, p. 71-77, 2003.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1218-1226, 2012a.

SILVA, V. J.; SILVA, C. R.; FINZI, R. R.; DIAS, N. S. Métodos para estimar radiação solar na região noroeste de Minas Gerais. **Ciência Rural**, v. 42, n. 2, p. 276-282, 2012b.

SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A.; CARVALHO, D. F. Relações do saldo de radiação em grama batatais e capim tanzânia com a

radiação solar global em Piracicaba-SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, n. 3, p. 250-256, 2007.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 - TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

SOUZA, A. P.; ESCOBEDO, J. F. Estimativas da radiação global incidente em superfícies inclinadas com base na razão de insolação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 3, p. 483-491, 2013.

SOUZA, J. D.; SILVA, B. B.; CEBALLOS, J. C. Estimativa da radiação solar global à superfície usando um modelo estocástico: caso sem nuvens. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 1, p. 31-44, 2008.

TIBA, C. **Atlas solarimétrico do Brasil**: Banco de dados terrestres. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p.

VAREJÃO-SILVA, M. A. (Ed. 2). **Meteorologia e Climatologia**. Recife, 2006. 463 p.

VICTORIA, I. M. B. **Medição da radiação solar global e difusa utilizando piranômetro com sensores fotovoltaicos**. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Meteorologia) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - RS, 2008.

VILELA W. A. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar**. 178f. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – SP, 2010.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria dos erros**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1998.

WANG, S.; DAVIDSON, A. Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 142, n. 2-4, p. 133-142, 2007.

WANG, S.; TRISHCHENKO, A. P.; SUN, X. M. Simulation of canopy radiation transfer and surface albedo in the EALCO model. **Climate Dynamics**, v. 29, n. 6, p. 615-632, 2007.

WMO. **Guide to meteorological Instruments and methods of observation**. [S.l.], World Meteorological Organization, 2008.

ZANETTI, S. S.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; POSSE, R. P.; MELO JÚNIOR, J. C. F. Estimação do saldo de radiação e da evapotranspiração de referência, em função das temperaturas máxima e mínima do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 12, n. 1, p.134-139. 2006.

CAPÍTULO 1

AVALIAÇÃO DE PIRANÔMETROS EM CONDIÇÕES DE CAMPO

Avaliação de piranômetros em condições de campo

Autora: Nara Tosta Santos

Orientador: Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira

Coorientadora: Profa. Dra. Valéria Peixoto Borges

RESUMO: Os estudos envolvendo a radiação solar são importantes por esta ser a principal fonte de energia para os processos físicos e biológicos que ocorrem na biosfera, sendo de fundamental importância para os processos de fotossíntese, de aquecimento e evapotranspiração. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de sensores de radiação solar incidente (piranômetros), CS300, SP-Lite, LICOR, LP02, em relação ao saldo radiômetro modelo CNR4 considerado como referência. O estudo foi desenvolvido na área experimental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, situada no município de Cruz das Almas – BA, (12°44'39" S; 39°06'23" W, 225 m de altitude) durante 93 dias, foram coletados dados horários de cada sensor. O desempenho de cada sensor foi avaliado comparando-se com o sensor de referência CNR4 usando os indicadores estatísticos: coeficiente de determinação (r^2), erro padrão de estimativa (SEE). Os resultados obtidos evidenciaram que todos os sensores avaliados tiveram desempenhos satisfatórios, podendo substituir o modelo de referência (CNR4) com segurança e precisão para as condições em que foram testados. As diferenças encontradas nas medidas podem ser consideradas pequenas, uma vez que existe uma concordância muito boa entre estes instrumentos baseado nos indicadores estatísticos de comparação.

PALAVRAS CHAVES: radiação solar incidente, piranômetro, saldo radiômetro.

Field evaluation of pyranometers

Author: Nara Tosta Santos

Advisor: Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira

Co-Advisor: Prof. Dra. Valéria Peixoto Borges

ABSTRACT: Studies involving solar radiation are important since this is the main source of energy for the physical and biological processes occurring in the biosphere, being of fundamental importance for the processes of photosynthesis, heating and evapotranspiration. This work aimed to evaluate the incident solar radiation sensor performance (pyranometers), CS300, SP-Lite, LI200X, LP02, compared to the balance radiometer CNR4 model considered as a reference. The study was conducted in the experimental area of the University Federal of Recôncavo Bahia, located in Cruz das Almas - BA, (12°44'39 " S; 39°06'23 " W, 225 m above sea level) for 93 days were collected hourly data of each sensor. The results showed that all evaluated sensors had satisfactory performance can replace the reference model (CNR4) safely and accurately to the conditions under which they were tested. The differences in the measurements can be considered small, since there is very good agreement between these instruments based on the comparison statistical indicators.

KEY-WORDS: global solar radiation, pyranometer, net radiometer

INTRODUÇÃO

A radiação solar é fonte primária para todos os processos termodinâmicos que ocorrem na superfície terrestre, ou seja, é a responsável por transferir toda energia na atmosfera e afetar todos os outros elementos (temperatura, pressão, vento, chuva, umidade, etc.). Trata-se, portanto, de um elemento primordial no entendimento da variação dos demais (PEREIRA et al., 2007).

Assim, a variação da quantidade de radiação solar incidente, depende da latitude do local, das condições atmosféricas e altura do Sol ao longo do dia, resultando em condições ambientais diferenciadas e, por conseguinte, promove alteração nos demais processos. Dessa forma, torna-se de fundamental relevância o monitoramento da sua variação espacial e temporal (ARAÚJO, 2005).

O estudo da radiação solar é essencial nas mais diversas áreas do conhecimento humano, como por exemplo, permite caracterizar o clima de uma região, e está diretamente ligada aos fenômenos meteorológicos e aos componentes atmosféricos, possuindo também influência sobre os principais processos biológicos e fisiológicos na Terra, sendo de grande importância na agricultura, como no uso racional dos recursos hídricos, por meio da estimativa da evapotranspiração em projetos de sistemas de irrigação, nos modelos de crescimento de plantas, na estimativa de mudanças climáticas e na análise dos impactos ambientais nos diferentes ecossistemas (FRUTEIRA et al., 2011).

Normalmente, os dados de radiação solar são fornecidos pelos serviços meteorológicos através da coleta em estações solarimétricas distribuídas por diversas áreas em diversos países. Estes serviços geralmente oferecem dados de alta precisão e os seus aparelhos de medida são periodicamente calibrados (VILELA, 2010).

Diversos trabalhos científicos vêm se dedicando a produzir estimativas de radiação solar, em locais com ausência de equipamentos ou quando há muitos dias sem registro, devido a falhas no equipamento e outros problemas (DANTAS et al., 2003; BORGES et al., 2010; BURIOL, et al., 2012; SILVA et al., 2012; BELÚCIO, et al., 2014).

O interesse em monitorar as variáveis climáticas remonta à antiguidade, dada à importância de entender o complexo sistema chamado meio ambiente. (FORNARI et al., 2012). Sobretudo medidas de radiação solar cuja aplicação é ampla e seu interesse técnico-científico vêm sendo estimulado com o desenvolvimento de dispositivos denominados sensores, capazes de fornecerem medidas sobre grandezas físicas (WMO, 2008).

Segundo Bastos (2002), sensores são dispositivos que variam suas propriedades sob a ação de uma grandeza física, fornecendo um sinal que indica essa grandeza, ou seja, um sensor é um dispositivo que recebe e responde a um sinal ou estímulo, que pode ser definido como uma quantidade, propriedade ou condição que é percebida e convertida em um sinal elétrico (FRADEN, 2004).

A forma mais precisa para quantificar a radiação incidente na superfície é sua medida direta, por meio de um instrumento denominado piranômetro. São divididos em dois tipos quanto a sua construção: piranômetros térmicos (à base de termopares) e piranômetros fotovoltaicos (à base de silício).

De acordo com Freire (2008) os piranômetros térmicos são mais precisos e tomados como padrão para as calibrações, visto que medem a radiação solar incidente em praticamente todo o seu espectro, de 300 nm a 3000 nm, enquanto que os piranômetros fotovoltaicos operam em um espectro mais limitado, de 400 nm a 1100 nm, entretanto, o seu baixo custo em relação aos térmicos, sua tensão de saída elétrica elevada (uma ordem de grandeza superior aos sensores térmicos) e seu tempo de resposta a variações de radiação quase instantânea fazem com que esses instrumentos sejam particularmente úteis para aplicações em uma rede solarimétrica, como piranômetros secundários, para interpolar estações que utilizam piranômetros termoelétricos ou para a detecção de rápidas flutuações na radiação solar (GROSSI, 2002).

O instrumento utilizado como referência no presente trabalho foi o piranômetro do saldo radiômetro modelo CNR4, devido sua precisão, garantia de qualidade e elevado grau de pesquisa. Este foi responsável por medir a intensidade da radiação solar incidente para a validação do desempenho de outros piranômetros de menor custo de aquisição.

Diante dessa abordagem, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de sensores de radiação solar incidente (piranômetros) com diferentes elementos sensores em relação ao piranômetro do saldo radiômetro CNR4 considerado referência para condições climáticas de Cruz das Almas-BA.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização do experimento

O presente estudo foi desenvolvido na área experimental da UFRB - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, campus universitário de Cruz das Almas, Bahia (12°44'39" S; 39°06'23" W, 225 m anm). O clima é classificado como úmido a subúmido, com umidade relativa média de 80% e temperatura média anual de 24,1°C, apresentando pluviosidade média anual de 1.170 mm (ALMEIDA, 1991). De acordo com a classificação de Köppen, enquadra-se no tipo Aw a Am (BAPTISTA & OLIVEIRA, 1998).

O solo da área experimental é caracterizado como Latossolo Amarelo. O local do estudo era predominantemente coberto com gramínea de porte baixo (*Brachiaria decumbens*).

A área do experimento foi escolhida por apresentar características desejadas como: facilidade de acesso, tipo de cobertura vegetal, amplo horizonte, livre de obstáculos (árvores, edificações, dentre outros) que pudessem sombrear os instrumentos e prejudicar a medição da radiação solar bem como o fluxo de vento, o que certamente iria dificultar a obtenção de leituras confiáveis das variáveis meteorológicas. A confiabilidade das medidas em geral depende das condições locais adequadas onde o sistema está

instalado, da qualidade da instrumentação utilizada e da calibração dos sensores.

A área do experimento possui topografia plana e dimensão de 42 m x 42 m (1764 m²), no qual foi cercada de maneira a garantir a segurança e a integridade física dos instrumentos evitando o acesso de animais e pessoas não autorizadas.

Os instrumentos e equipamentos de coleta de dados foram instalados nos quadrantes nordeste (QNE) e sudeste (QSE) da área experimental.

Instrumentos utilizados no experimento

Uma vez delimitada a área experimental, utilizou-se uma bússola para definir a direção do norte verdadeiro, subtraindo-se do norte magnético a declinação magnética local para aquela data, em torno de (23°).

Os equipamentos utilizados no experimento eram novos, nunca haviam sido utilizados, portanto, permanecia com calibração de fábrica, cuja metodologia de calibração é geralmente apresentada nos respectivos manuais (Apêndice A).

Para medição da radiação solar incidente (R_s) foram utilizados os modelos de piranômetros conforme descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos modelos de instrumentos de radiação solar instalados na área experimental.

Fabricante	Modelo	Quantidade	Variáveis medidas
Kipp & Zonen	CNR4	2	$R_s, R_r, R_{atm}, R_{sup}$
Apogee	CS300	2	R_s
Kipp & Zonen	SP-Lite	2	R_s
Hukseflux	LP02	1	R_s
LI-COR	LI200X	1	R_s

R_s = radiação solar incidente; R_r = radiação solar refletida; R_{atm} = radiação atmosférica incidente; R_{sup} = radiação terrestre emitida pela superfície.

Piranômetros térmicos

Os modelos de piranômetros térmicos foram o CNR4 (*Kipp & Zonen B.V. Delft, The Netherlands*) e o LP02 (*Hukseflux Thermal Sensors B.V. Delft The Netherlands*). O sensor CNR4 foi utilizado como referência no presente estudo, de acordo com o fabricante, o CNR4 apresenta características individuais que determinam a sua acurácia, robustez e qualidade na obtenção dos dados, de acordo com os critérios estabelecidos pela ISO 9060 (Apêndice B). Geralmente a acurácia é alta em relação a outros saldo radiômetros e oferece calibração individual para cada sensor.

Tanto o CNR4 quanto o LP02 mede a radiação de onda curta na faixa espectral de 305-2800 nm (Tabela 2) utilizando um detector termopilha enegrecida. O mesmo gera um sinal em mV, que é proporcional à radiação de onda curta incidente. O fator de conversão entre a tensão (mV) e a radiação solar incidente ($W m^{-2}$) é a calibração, chamada constante C (ou sensibilidade) (Equação 1 e Tabela 2).

$$E = \frac{V}{C} \quad (1)$$

em que: E - radiação solar incidente ($W m^{-2}$); V – tensão gerado pelo sensor, mV; C – constante de calibração ou sensibilidade ($W m^{-2} mV$).

Piranômetros fotovoltaicos

Os modelos de piranômetros fotovoltaicos foram CS300 (*Apogee Instruments, Logan, UT, USA*), SP-Lite (*Kipp & Zonen B.V. Delft, The Netherlands*) e LI200X (*LICOR Biosciences, Inc., Lincon, NE, USA*). Os sensores fornecem R_s utilizando um detector fotovoltaico de silício que converte numa voltagem, proporcional a radiação solar incidente em tensão elétrica (CAMPBELL, 2004). Os sensores SP-Lite e LI200X medem a radiação solar incidente na faixa espectral de 400-1100 nm, enquanto que o sensor CS300 mede na faixa espectral de 300-1100 nm. Todos esses sensores são calibrados utilizando piranômetros térmicos.

As características apresentadas pelos piranômetros citados encontram-se relacionadas na Tabela 2, seguindo informações dos manuais de cada sensor individualmente.

Tabela 2. Especificações gerais dos modelos de piranômetros do estudo.

Sensor Piranômetro	Intervalo espectral	Sensibilidade (nominal)	Sinal de saída do sensor	Temperatura de operação
CNR4	305-2800 nm	5 a 15 $\mu\text{V/W/m}^2$	± 5 mV	-40 °C a +80 °C
LP-02	305-2800 nm	15 $\mu\text{V/W/m}^2$	0,1 a 50 mV	-40 °C a +80 °C
LI-200X	400-1100 nm	-	0,2 $\text{kW/m}^2/\text{mV}$	-40 °C a +65 °C
SP-Lite	400-1100 nm	10 $\mu\text{V/W/m}^2$	0 - 15 mV	-30 °C a +70 °C
CS300	300-1100 nm	-	0,2 mV/W/m^2	-40 °C a +55 °C

Adicionalmente, utilizou-se um sensor para medir a umidade relativa e a temperatura do ar, um sensor para a velocidade e direção do vento e um sensor de precipitação pluviométrica.

A temperatura do ar e umidade relativa foram medidas por um termohigrômetro modelo HMP60 (*Vaisala, Inc. Helsinki, Finland*). Esse sensor ficou dentro de um abrigo meteorológico com o intuito de evitar a exposição direta dos elementos sensores aos raios solares e à chuva, além de garantir a livre circulação do ar, permitindo um equilíbrio com a atmosfera externa. Esse conjunto sensor foi instalado no lado contrário aos sensores de radiação a 2 metros do solo, seguindo as normas da Organização Mundial de Meteorologia – OMM (WMO, 2008).

A velocidade e direção do vento foram medidas por meio de um anemômetro de canecas, modelo 03002 Wind Sentry Set (RM Young, inc., USA) instalado a 3 m de altura do solo.

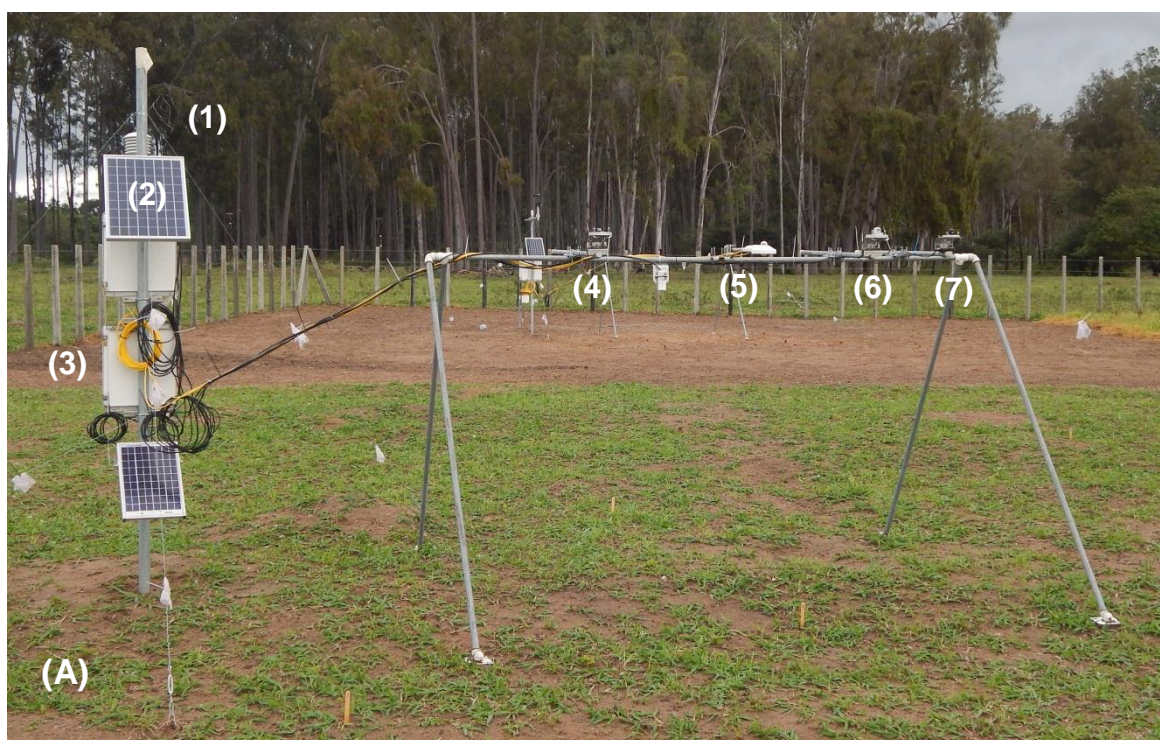
A precipitação pluviométrica foi medida por meio de um pluviômetro de balança modelo TE-525MM (*Texas Eletronics, Inc., Dallas, TX, USA*) instalado a 0,5 m de altura do solo.

Como mencionado anteriormente, os instrumentos foram distribuídos na área experimental do lado leste, no quadrante nordeste (QNE) e no quadrante sudeste (QSE).

Estrutura de suporte e coleta de dados

O conjunto instrumental utilizado nesse estudo foi instalado seguindo as recomendações dos manuais dos sensores, com orientação norte para evitar a presença de sombra na área onde se encontram as instalações dos instrumentos de medição.

No centro dos quadrantes QNE e QSE instalou-se um suporte para os instrumentos com 1,5 m de altura, constituído de uma barra metálica de 2,5 m de comprimento em tubo de aço galvanizado (25 mm diâmetro) apoiada em dois tripés do mesmo material (Figura 1AB). As duas estruturas de suporte dos sensores estão a uma distância de aproximadamente 20 m uma da outra. Foi necessário ancorar a barra metálica com cabos para dar firmeza à estrutura e prevenir contra vibrações provocadas pela ação do vento.





a) 1 – Termohigrometro; 2 - painel solar; 3 - datalogger; 4 - LI200X; 5 - CNR4; 6 - SP-Lite; 7 - CS300. (b) 1- anemômetro; 2 - painel solar; 3 - datalogger; 4 - pluviômetro; 5 - SP-Lite; 6 - CS300; 7 - CNR4; 8 - LP02.

Figura 1. Área experimental com a estrutura metálica de suporte com os sensores instalados (A) quadrante nordeste; (B) quadrante sudeste.

Foram definidos e montados os suportes para fixação dos instrumentos na barra metálica. A programação específica do datalogger foi realizada e o sistema de aquisição de dados foi configurado. Durante a etapa de instalação dos instrumentos no campo experimental, os piranômetros foram conectados às barras por um suporte individual e cuidadosamente nivelado em relação ao solo.

Para a aquisição e armazenamento de dados todos os instrumentos foram conectados ao sistema acumulador de dados, datalogger modelo CR1000 (*Campbell Scientific Inc, Logan, UT, USA*). O mesmo foi programado para registrar o sinal dos sensores conectados aos terminais, fazer o processamento do sinal, digitalizar e armazenar na memória, gerando assim uma tabela de dados com indicação do número de medição, data e hora.

Posteriormente estas informações foram transferidas para um computador através de conexão USB.

A leitura dos dados no datalogger foi definida a partir dos registros a cada 5 segundos, e o armazenamento dos dados gerados foram agrupados em médias e totais a cada 60 minutos.

Como os instrumentos estavam em área remota, foram utilizados painéis solares para fornecer energia elétrica à bateria recarregável, e assim manter os sensores também no período noturno e em dias nublados.

A rotina de manutenção dos instrumentos no campo durante o experimento incluiu a verificação do funcionamento, o estado de conservação dos sensores, o nivelamento, a limpeza nas cúpulas dos piranômetros, principalmente depois da ocorrência de chuva e a verificação semanal da carga elétrica da bateria estacionária.

O intervalo de dados válidos compreende o período de 18 de junho a 19 de setembro de 2014, totalizando 93 dias de coleta, disponibilizando dados de radiação solar incidente por diversos instrumentos, temperaturas média do ar, umidade relativa do ar, precipitação, velocidade e direção do vento. Os dados de radiação solar foram expressos em $W\ m^{-2}$ na escala horária e integrados para $MJ\ m^{-2}$ na escala diária.

Análise dos dados

Antes de submeter os dados experimentais à análise estatística e comparativa, foi realizada uma análise da qualidade, para detectar e filtrar possíveis medidas discrepantes, visando obter um conjunto de dados representativos, com ênfase nos valores de radiação solar incidente. Os dados eliminados da série foram valores negativos antes do nascer e após o pôr do sol e os dados correspondentes aos dias de manutenção na área experimental. As falhas em decorrência de dados ausentes foram corrigidas por meio de modelos de regressão.

A avaliação da qualidade dos dados foi realizada em planilhas eletrônicas e posteriormente, os dados foram processados com o auxílio do programa computacional REF-ET (ALLEN, 2013), sendo possível analisar a curva de radiação solar incidente em dia de céu claro (R_{so}) estimada com base no

conteúdo de vapor d'água e em seguida, comparou-se com os dados medidos de R_s . Parte-se da premissa de que dentro de um intervalo de dados há registros de dias completamente claros e para os quais a radiação solar medida é máxima (ALLEN, 1996). O autor ainda afirma que um desvio sistemático de R_s em relação a R_{so} é indicativo de possíveis problemas de calibração ou mal funcionamento do instrumento.

Na determinação de R_{so} adotou-se um procedimento que leva em conta os coeficientes de transmissividade atmosférica para radiação direta e difusa (Equação 2).

$$R_{so} = (K_B + K_D) \cdot R_a \quad (2)$$

em que:

K_B - coeficiente de transmissividade atmosférica para radiação direta, adimensional; K_D - coeficiente de transmissividade atmosférica para radiação difusa, adimensional; R_a - radiação incidente no topo da atmosfera diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$).

O valor de K_B foi determinado como segue (Allen, 1996) (Equação 3).

$$K_B = 0,98 \exp \left[\frac{-0,00146P}{K_t \sin \phi} - 0,075 \left(\frac{W}{\sin \phi} \right)^{0,4} \right] \quad (3)$$

em que:

P - pressão atmosférica estimada com base na altitude local, kPa (98,67 para Cruz das Almas, BA); K_{tb} - coeficiente de turbidez atmosférica, adimensional (igual a 1,0 para Cruz das Almas – ar relativamente limpo); ϕ - ângulo do Sol acima do horizonte, radianos; W - água precipitável na atmosfera, mm.

Na Equação. 4 o valor de ϕ para intervalos diários é calculado com base na latitude local e época do ano, como segue:

$$\sin \phi_{24} = \sin \left[0,85 + \phi 0,3 \sin \left(\frac{2\pi DDA}{365} - 1,39 \right) - 0,42 \phi^2 \right] \quad (4)$$

em que:

ϕ_{24} – valor médio de ϕ durante o período diurno, ponderado em função de R_a , radianos; ϕ – latitude, radianos; DDA – número de ordem do dia do ano, adimensional.

$$W = 0,14e_a P + 2,1 \quad (5)$$

Uma vez determinado o valor de K_B , o coeficiente K_D foi calculado pela Equação 6 (Allen, 1996):

$$K_D = 0,35 - 0,36K_B \quad (6)$$

A caracterização de dia de céu claro foi feita com base na metodologia de Iqbal (1983), por meio do índice de claridade (K_t) que é um indicador das condições de transmissividade atmosférica. Valores de K_t inferiores a 0,3 indicam céu nublado, valores superiores a 0,7 sinalizam céu claro e valores de 0,3 a 0,7 sinalizam céu parcialmente nublado.

A radiação solar incidente no topo da atmosfera (R_a) foi estimada (Equação 7) com o auxílio do programa computacional REF-ET (ALLEN, 2013).

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (7)$$

em que:

G_{sc} - constante solar = $0.0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$; d_r - distância relativa Terra-Sol; ω_s - ângulo horário no pôr do sol, radianos; φ - latitude, radiano; δ - declinação solar, radiano.

O índice de claridade foi definido pela Equação 8.

$$K_t = \frac{R_s}{R_a} \quad (8)$$

Através dos gráficos que proporcionaram uma melhor visualização e interpretação dos dados coletados, foram escolhidos dias típicos, contemplando períodos de baixa e alta nebulosidade.

As medidas de radiação solar incidente com os piranômetros (CS300, SP-Lite, LI200X, LP02) foram comparadas em relação ao adotado como referência (CNR4).

As análises estatísticas, os cálculos, a confecção de gráficos e tabelas foram feitos utilizando-se planilha eletrônica. Foram aplicados índices estatísticos para comparar a radiação solar incidente dos sensores mencionados anteriormente, tais como: erro padrão de estimativa (SEE) (Equação 9), coeficiente de determinação (r^2) (Equação 10).

$$SEE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y)^{0,5}}{n - 1} \quad (9)$$

em que:

y_i - radiação solar medida (R_s); y - radiação solar medida pelo CNR4; n - número de observações.

$$r^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

em que:

y_i - radiação solar medida pelos piranômetros avaliados; x_i - radiação solar medida pelo piranômetro considerado padrão; \bar{x} - média da radiação solar medida; \bar{y} - valor da média da radiação solar medida pelos piranômetros avaliados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o experimento, a temperatura do ar oscilou de 19,6°C a 24,3°C, com média de 21,8°C; e a umidade relativa variou de 73,9% a 92,5%, com média de 83,1% (Figura 2). A precipitação acumulada durante o período de estudo foi de 305,9 mm (Figura 3).

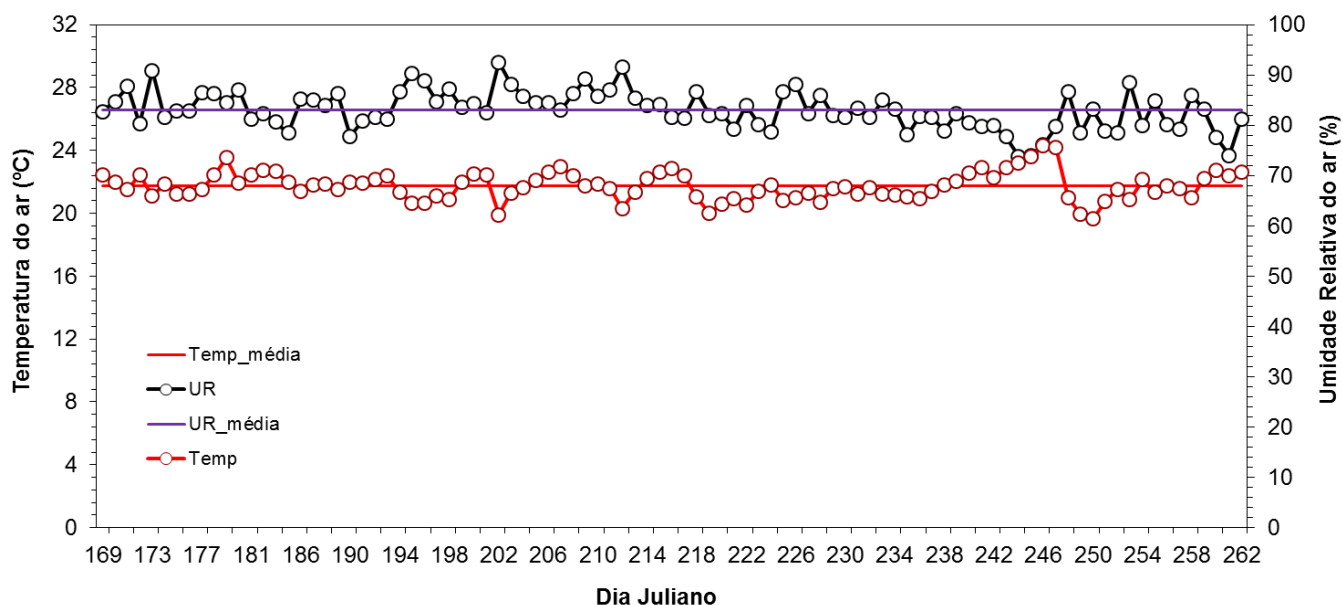


Figura 2. Evolução da temperatura média e da umidade relativa horária do ar no período de 169 a 262 dias após o início das medições.

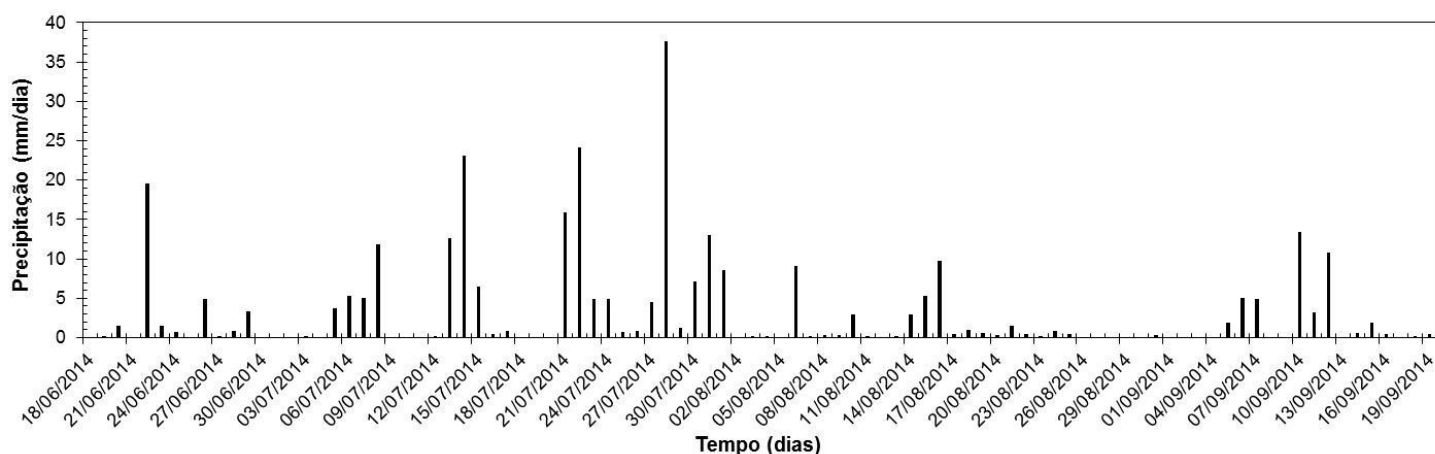


Figura 3. Precipitação total diária (mm) ao longo do período de estudo.

Radiação solar incidente medida pelo piranômetro do CNR4

A obtenção dos valores estimados da radiação solar incidente em dia de céu claro (R_{s0}) com base no conteúdo de vapor de água na atmosfera foi

necessária para a análise do controle de qualidade dos valores obtidos pelos sensores, pois de acordo com Allen (1996) um desvio sistemático de R_s em relação a R_{so} é indicativo de possíveis problemas de calibração ou mal funcionamento do instrumento.

Verificou-se que as ordens de grandezas dos valores da radiação incidente para um dia de céu totalmente claro (R_{so}) e radiação solar incidente (R_s) estão coerentes. Os dois sensores de referência estavam em perfeito funcionamento, seguindo ambos o mesmo curso diário, evidenciado pela coincidência das curvas nos gráficos. Na Figura 4 visualiza-se facilmente que a distribuição dos valores medidos de R_s estão limitados pela curva dos valores estimados de R_{so} .

Esse mesmo tipo de análise dos dados de radiação solar foi realizado anteriormente por Borges et al. (2010) na localidade de Cruz das Almas, BA. De acordo com os autores a correção dos dados medidos de R_s com base na curva de R_{so} é um procedimento simples de controle da qualidade dos valores medidos.

A análise dos dados foi considerada para duas condições: período de alta nebulosidade e período de baixa nebulosidade. É possível observar que a intensidade de R_s foi diferente nas duas condições avaliadas. Contudo, os valores máximos de R_s em ambas condições, ocorreram entre 11 h e 13 h (hora local) caracterizando o período do dia com maior incidência de radiação solar (Figura 4). A média de três dias de R_s na condição de alta nebulosidade foi de $111,25 \text{ W m}^{-2}$ e em baixa nebulosidade de $514,16 \text{ W m}^{-2}$.

A condição caracterizada pela alta nebulosidade entre os dias 20/07/2014 à 22/07/2014 [dias julianos (DJ) 201, 202, e 203] foi marcada pela presença de muitas nuvens, quando o céu ficou encoberto na maior parte do tempo, principalmente nas horas de maior intensidade da radiação solar, predominando a radiação solar difusa. Nesta condição, as curvas de R_s não acompanham a sinuosidade da radiação solar em dia de céu claro, devido a presença de muitas nuvens.

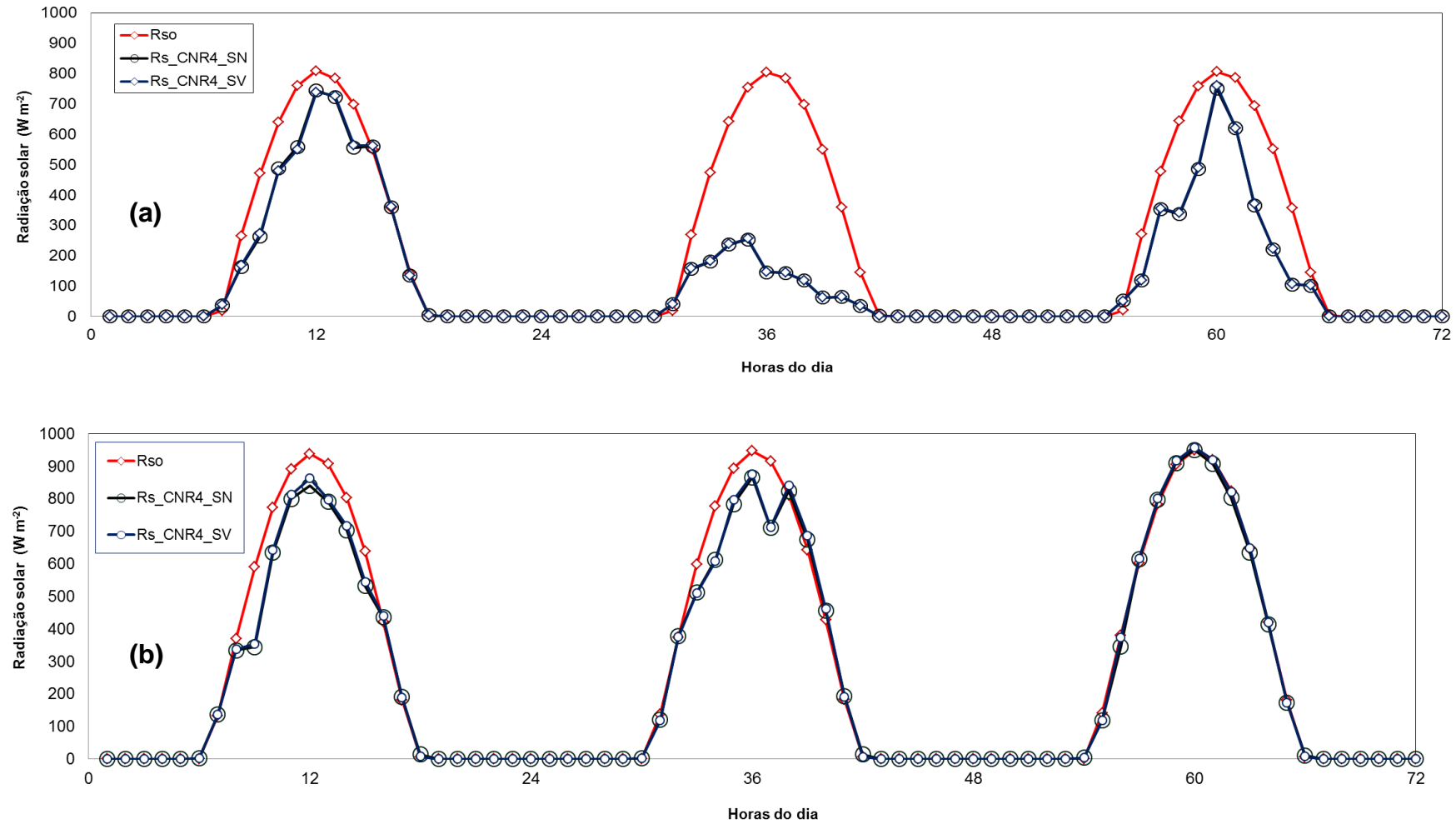


Figura 4. Valores medidos de R_s delimitados pela curva da radiação solar esperada em dia claro R_{so} , para condição de alta nebulosidade [dias julianos, (DJ) 201, 202, e 203] (a) e para condição de baixa de nebulosidade (DJ) 243, 244 e 245) (b).

No dia juliano 202, devido a essa alta nebulosidade, ocorreu precipitação no período diurno, acumulada de 15,8 mm, ou seja, as nuvens reduziram a intensidade de R_s que atingiu a superfície, determinando o maior valor registrado às 11 h de $257,0 \text{ W m}^{-2}$ (CNR4_QNE) e $254,5 \text{ W m}^{-2}$ (CNR4_QSE). Neste mesmo dia o coeficiente de transmissividade (K_t) foi de 0,18, que segundo a classificação de Iqbal (1983). Nos dias 201 e 203 com base nos valores K_t a atmosfera foi classificada como mediana com $K_t = 0,57$ e $0,43$, respectivamente.

Segundo Querino et al. (2011), em condições de alta nebulosidade, tem-se uma transmitância média inferior a 60%, assinalando-se uma atmosfera menos transparente, o qual absorve, reflete e espalha mais radiação solar, resultando na redução da transmissão.

Na condição caracterizada pela baixa nebulosidade, entre os dias 30/08/2014 a 02/09/2014 (DJ = 243, 244 e 245) não foi registrado nenhum valor de precipitação durante este período, porém, observa-se que ocorreu uma tendência de crescimento na intensidade de R_s nos dias selecionados, cujo maior valor registrado foi de $958,0 \text{ W m}^{-2}$ (CNR4_QNE) e $950,0 \text{ W m}^{-2}$ (CNR4_QSE) às 12 h do dia 02/09/2014. Os valores de R_s se aproximaram bastante da curva estimada em dia de céu claro, devido a uniformidade de distribuição da radiação durante todo o dia. Para esta condição, o valor de K_t foi igual a 0,71, bem superior ao dia mencionado anteriormente, o que permitiu classificá-lo como dia de céu claro.

De acordo com Querino et al. (2011), a condição de $K_t \geq 0,70$, caracteriza alta transmissividade atmosférica, implicando em uma quantidade mais abundante da radiação direta, e por consequência, menos radiação difusa.

O desvio padrão de estimativa foi de $5,22 \text{ W m}^{-2}$ para a regressão dos saldo radiômetros CNR4, correspondendo a 1,5% do valor médio ($357,67 \text{ W m}^{-2}$) da radiação solar incidente. Os sensores chegaram a atingir valores máximos no dia de céu claro entre 11 h e 12 h com intensidade de radiação de aproximadamente de 1000 W m^{-2} . Isso mostra que os sensores estão em consonância, pois pelo ajuste da equação de regressão, ($y = ax + b$) os coeficientes a e b estão próximos a um e zero, respectivamente (Figura 5).

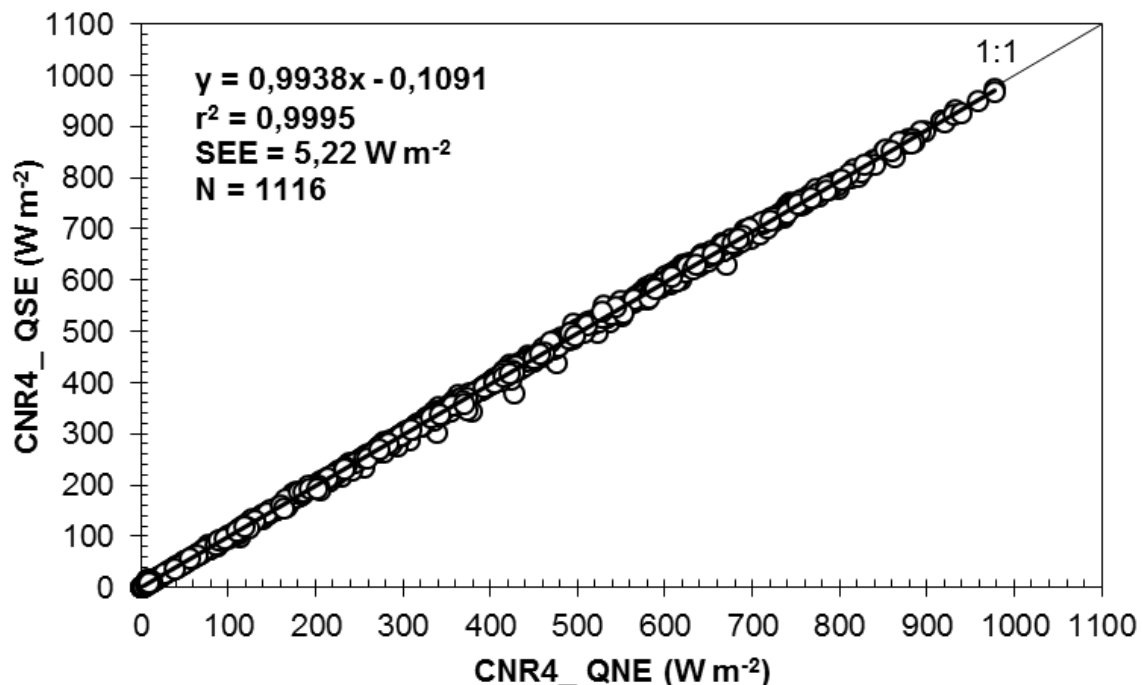


Figura 5. Análise de regressão para a radiação solar incidente medida pelos piranômetros do saldo radiômetros CNR4 no município de Cruz das Almas – Bahia (julho a setembro de 2014).

Simultaneamente, verificou-se que a precipitação durante o experimento não causou distorção nos dados de R_s medidos, pois obtendo as regressões com todos os dados gerados e em seguida, as regressões com o isolamento do período chuvoso e seco separadamente. Os eventos de precipitação não causaram impacto nas medições, pois os sensores tiveram performance semelhante tanto na presença de chuva, quanto na ausência de chuva. Isso pode ser justificado pelo próprio design do sensor, que apresenta uma cúpula redonda de vidro que protege o sensor térmico das intempéries (vento, chuva e poeira) evitando o acúmulo de água em cima do mesmo e que também as estruturas metálicas utilizadas na área experimental se localizarem próximas uma da outra (aproximadamente 20 m de distância).

Radiação solar medida nos piranômetros

Visualmente, quando se verifica os resultados da análise de qualidade dos dados em função do tempo utilizando a relação dos dados estimados de

R_{so} com os dados medidos de R_s pelos demais piranômetros estudados, pode-se afirmar que os valores medidos ficaram limitados pela curva da radiação em dia céu claro, e apresentaram comportamentos de tendência e de magnitude de R_s semelhantes, com poucas diferenças entre os valores obtidos na análise com o sensor de referência nas duas condições estudadas, comprovando que os sensores não estavam com problemas de mal funcionamento.

As diferenças nos valores apresentados entre os piranômetros avaliados são possivelmente relacionadas às limitações do próprio instrumento, como por exemplo: a diferença no tipo do sensor utilizado devido a fabricação dos mesmos. Isto fica claro quando se efetua a comparação entre os instrumentos quanto seu desempenho, observa-se que existe uma concordância muito boa entre os mesmos em relação à referência, evidenciada por excelentes ajustes nas equações de regressão.

As Figuras 6 e 7 mostram as curvas de regressão linear com os valores de R_s medidos pelo CNR4 no eixo das ordenadas e os valores R_s pelos diferentes sensores no eixo das abscissas, nas escalas horária e diária.

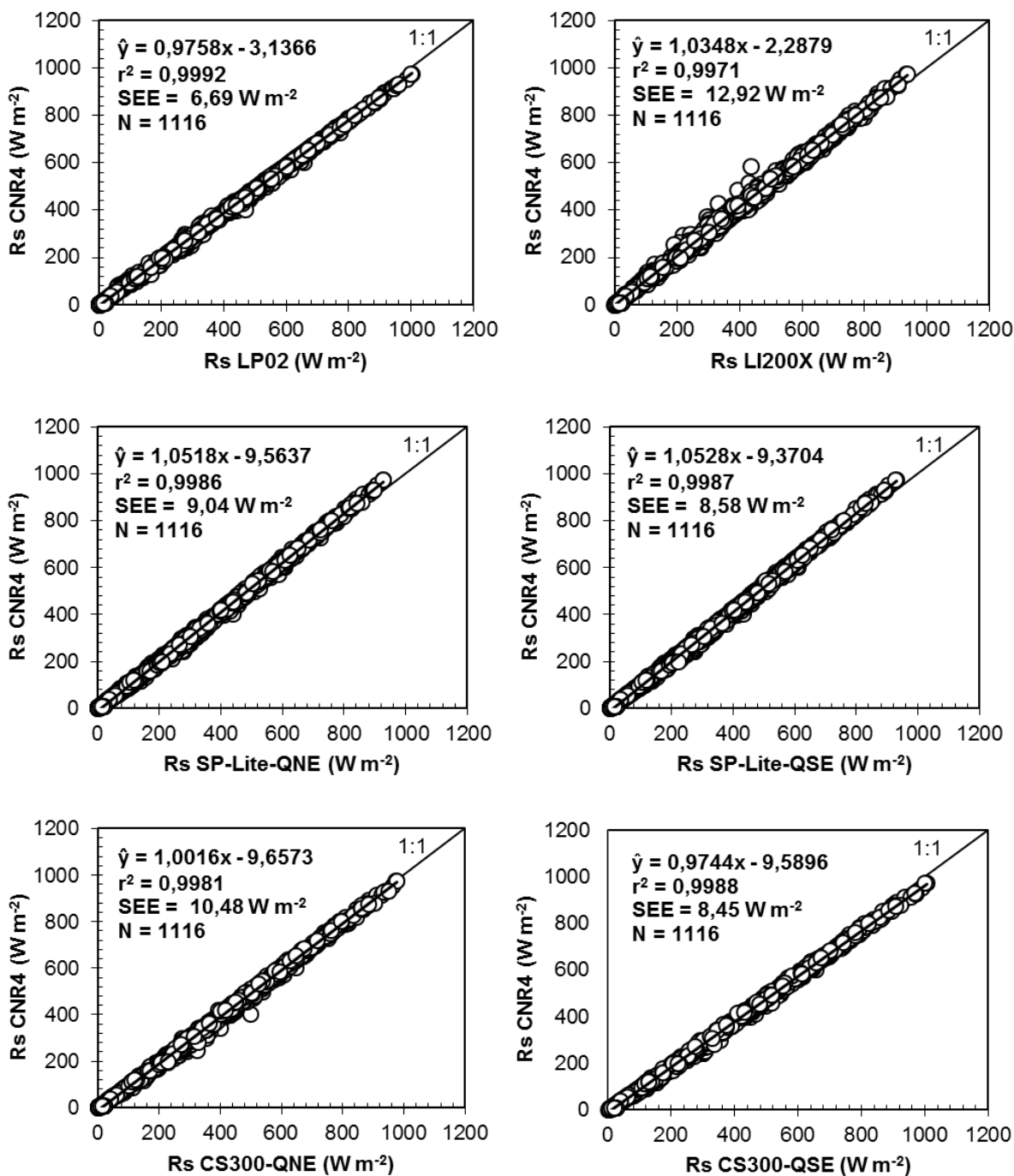


Figura 6. Regressão linear entre dados horários de radiação solar incidente (W m^{-2}) medidos no período de 93 dias pelo piranômetro do saldo radiômetro CNR4 e pelos seis piranômetros avaliados, para cálculo dos coeficientes lineares, angulares, determinação e o desvio padrão de estimativa.

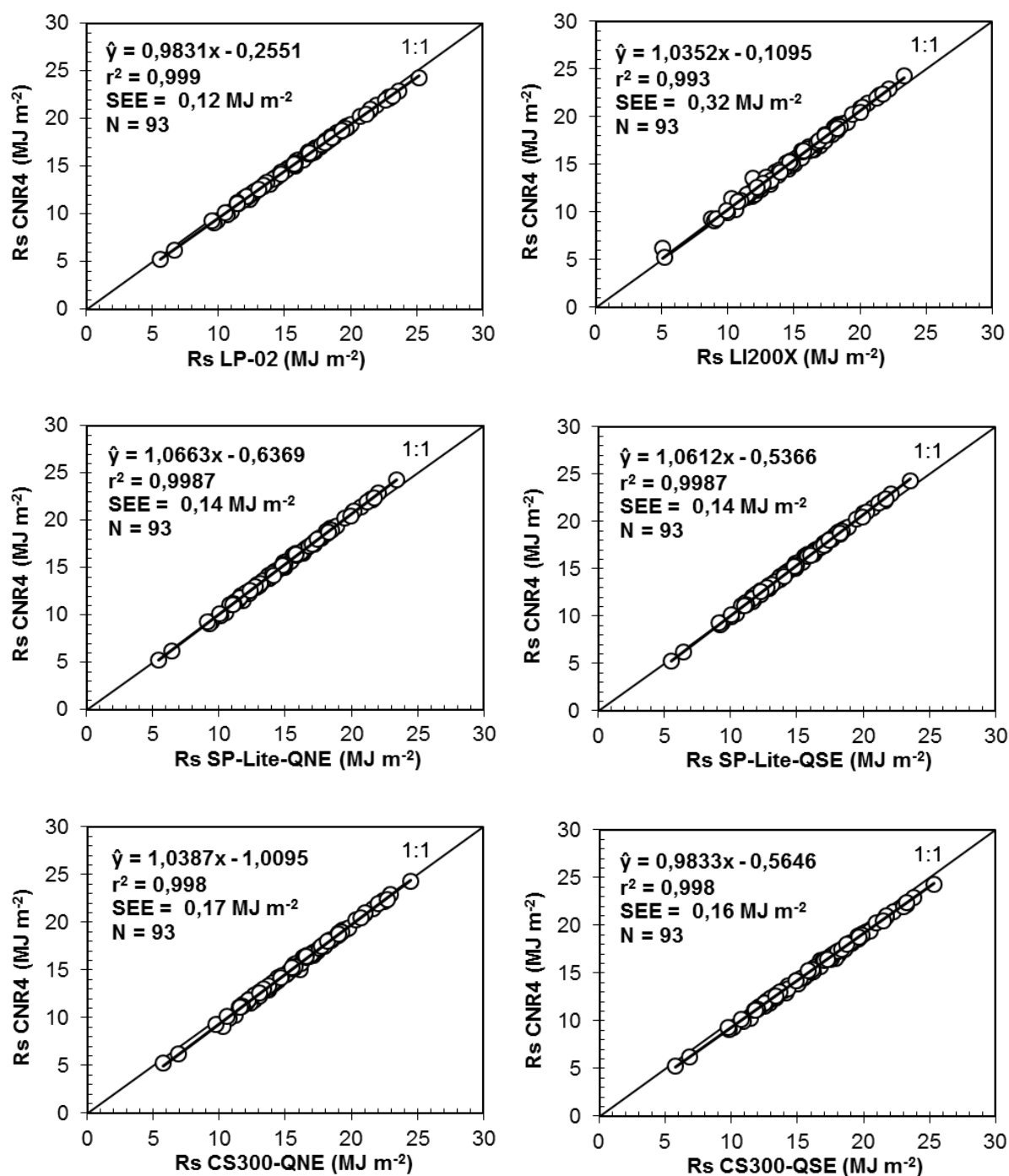


Figura 7. Regressão linear entre dados diários de radiação solar incidente (MJ m⁻²) medidos no período de 93 dias pelo piranômetro do saldo radiômetro CNR4 e pelos seis piranômetros avaliados, para cálculo dos coeficientes lineares, angulares, determinação e o desvio padrão de estimativa.

Observa-se pelo r^2 que todos os sensores tiveram desempenhos semelhantes, sendo que o maior r^2 foi observado para a relação entre o CNR4

x LP02 e o menor para a relação CNR4 x LI200X, em ambas às escalas de tempo. O desvio padrão de estimativa na escala horária variou do menor valor ($6,69 \text{ W m}^{-2}$) para o LP02 e o maior valor ($12,92 \text{ W m}^{-2}$) para o LI200X em relação ao CNR4, correspondendo a 1,9% e 3,6% respectivamente ao valor médio ($357,67 \text{ W m}^{-2}$) obtido pelo sensor referência.

Os bons desempenhos apresentados pelos piranômetros são referenciados pela aproximação do ajuste da regressão com a reta 1:1. Vilela (2010) afirma que para realização de medidas com elevada exatidão, por exemplo, na medida de R_s é necessário que se tenha dados com pequena dispersão, ou seja, que sejam dados obtidos com elevada precisão.

De acordo com Tiba, et al. (2000) um piranômetro que utiliza uma célula solar está sujeito a um erro nas medidas de até 3% quando comparado com um piranômetro que utiliza uma termopilha, devido a não uniformidade na resposta espectral. Portanto, quando se considera somente a energia total incidente ao longo de um dia, este erro pode diminuir para menos de 1%.

Observa-se que de um modo geral, o piranômetro LP02 se destacou frente aos demais piranômetros estudados, pois apresentou a melhor correlação e elevado valor do coeficiente de determinação, retratando pequena dispersão entre os valores medidos, o que indica que os instrumentos estão em consonância. Este comportamento já era esperado devido à própria fabricação do piranômetro, que apresenta sensor do tipo termopilha, com a superfície receptora totalmente enegrecida, semelhante ao sensor utilizado como padrão.

Os piranômetros SP-Lite apresentaram desempenho muito parecido frente aos indicativos estatísticos, enquanto que os piranômetros CS300 apresentaram uma pequena diferença.

Segundo Vilela (2010), os erros sistemáticos presentes em instrumentos de medidas podem ser reduzidos ou eliminados por meio de recalibrações, melhorias no instrumento de medida ou por correção dos resultados. Os resultados do presente trabalho corroboram com trabalhos de Michalsky et al. (1987) citado por Vilela (2010), onde apontam que os sensores baseados em fotodíodo de silício fornecem dados de R_s com respostas quase instantâneas, com boas condições de utilização, tanto pelo desempenho apresentado, como pelo baixo custo em relação aos piranômetros de termopilha.

Conforme pressuposições de Guimarães et al. (2011) para um piranômetro espera-se uma resposta linear às variações do nível de radiação e que seja insensível às variações nos parâmetros ambientais, embora alguns desvios sejam comuns.

Vilela (2010) afirma que a medida R_s na superfície da Terra possui inúmeros erros aleatórios intrínsecos, tais como erros devido a mudanças atmosféricas, fumaça, nuvens, turbidez, variação da densidade da camada de ar que está sobre o piranômetro por causa da temperatura, atividades solares, ou mesmo sombras transitórias devido à passagem de pássaros ou sujeiras sobre o piranômetro. O autor ainda afirma que além de erros aleatórios intrínsecos ao mensurando, existem os erros aleatórios intrínsecos do próprio sistema de medida, como ruídos térmicos, eletromagnéticos e outros.

Outro fator que contribui para o aumento da incerteza da medida de R_s é a sensibilidade do sensor. A absorção de radiação solar que incide na superfície terrestre muda constantemente com o ângulo de incidência ao longo do dia e para sensores fotoelétricos dotados de silício, essa sensibilidade cai bruscamente para ângulos de incidência altos, não obedecendo à lei dos cossenos. Essa dependência angular de absorção dos sensores é chamada de resposta cosseno (MICHALSKY, 1995; VICTORIA 2008).

CONCLUSÃO

Todos os sensores estudados apresentaram excelentes desempenhos nas medidas da radiação solar incidente, podendo substituir o modelo de referência (CNR4) com segurança e precisão para as condições em que foram testados. As diferenças encontradas nas medidas podem ser consideradas pequenas, uma vez que existe uma concordância muito boa entre estes instrumentos baseado nos indicadores estatísticos de comparação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G. **Ref-ET: Reference Evapotranspiration Calculator**; Version 3.1.15 for Windows. Idaho: University of Idaho, 2013. 91 p.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. Roma: **FAO Irrigation and Drainage Paper**, n. 56. Rome, 297 p. 1998.

ALLEN, R. G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 122, n. 2, p. 97 - 106, 1996.

ALMEIDA, O. A. **Informações meteorológicas do CNP-Mandioca Fruticultura Tropical**. Cruz das Almas, BA: EMBRAPA - CNPMF. 1991. 35 p. EMBRAPA - CNPMF. Documentos, 34.

ARAUJO, K. D. **Variabilidade temporal das condições climáticas sobre as perdas de CO₂ na encosta do açude Namorados, em São João do Cariri PB**. 2005. 101f. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação do Solo e Água) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia – PB, 2005.

BASTOS, A. **Instrumentação, Eletrônica Analógica e Digital**. Rio de Janeiro RJ, 360 p. 2002.

BAPTISTA, W. A.; OLIVEIRA, L. M. **Atributos climáticos do estado da Bahia**. Salvador: SEI - Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, 1998. 85 p. (Série Estudos e Pesquisas, 38).

BELÚCIO, L. P.; SILVA, A. N.; SOUZA, L. R.; MOURA, G. B. A. Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 494 – 504. 2014.

BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO FILHO, M. A.; SILVA, T. S. M.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar

incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n.1, p. 74 - 80, 2010.

BURIOL, G. A.; ESTEFANEL, V.; HELDWEIN, A. B.; PRESTES, S.D.; HORN, J. F. C. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria - RS. **Ciência Rural**, v. 42, n. 9, p. 1563-1567, 2012.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG. **Ciência Agrotécnica**, v. 27, n. 6, p. 1260-1263, 2003.

FORNARI, C. I.; BELOTO, A. F.; VILELA, W. A.; BERNI, L. A. Unidade de monitoramento ambiental visando o estudo da irradiância solar em função da temperatura e umidade. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR E V CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DA ISES, 2012, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 2012.

FRADEN J. **Handbook of modern sensors**. 3.ed., [S.l.], Springer, 2004.

FREIRE, L. A. D. **Desenvolvimento de um piranômetro fotovoltaico**. 2008. 75f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 2008.

FRUTEIRA, R. S.; LEITE, M. L.; VIRGENS FILHO, J. S. Desempenho do modelo PGECLIMA_R na simulação de séries diárias sintéticas de radiação solar global para diferentes localidades do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 9, n. 1, p. 35 - 47, 2011.

GROSSI, H. G. **Notas sobre radiación solar**. **Universidad Nacional de Luján**, Departamento de Ciências Básicas. (ISBN 987-9285-19-0), Argentina, 2002.

GUIMARÃES, P.; SANTANA, M. A. A.; VILELA, W. A.; BERNI, L. A.; SILVA, L.; PAES, T. F. Avaliação da utilização de um simulador solar para calibração indoor de piranômetros. In: VIII Congresso Brasileiro de Metrologia, 2011, Natal - RN. **Anais...** Natal: 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 9060. Genebra, 1990.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Ed. AP. Vancouver Canadá, 1983. 389p.

KIPP & ZONEN. **Pyranometers Sensor** – Holland. Disponível em: <www.kippzonen.com> Acesso em 05/01/2015.

KIPP & ZONEN. CNR4 net radiometer: Instruction manual, Kipp and Zonen, Röntgenweg, The Netherlands, 2009.

LI-COR, LI200-X, **Pyranometer Sensor**. Disponível em: <<http://www.licor.com>>. Acesso em 05/01/2015.

MICHALSKY, J. J.; HARRISON, L. C.; BERKHEISER, W. E. Cosine response characteristics of some radiometric and photometric sensors. **Solar Energy**, v. 54, n. 6, p. 397 - 402, 1995.

MICHALSKY, J. J.; HARRISON, L. C.; LEBARON, B. A. Empirical radiometric correction of a silicon photodiode rotating shadowband pyranometer. **Solar Energy Journal**, v. 39. n. 2, p. 87 - 96. 1987.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. Ed. Revista e Ampliada, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- SP. 2007. 202 p.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; QUERINO, J. K. A. S.; VON RADOW, C. V.; MARQUES FILHO, A. O. Estudo da radiação solar global e do índice de transmissividade (K_t), externo e interno, em uma floresta de mangue em Alagoas – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 204 - 294, 2011.

SILVA, V. J.; SILVA, C. R.; FINZI, R. R.; DIAS, N. S. Métodos para estimar radiação solar na região noroeste de Minas Gerais. **Ciência Rural**, v. 42, n. 2, p. 276 - 282, 2012.

TIBA, C. **Atlas solarimétrico do Brasil: Banco de dados terrestres**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p.

VICTORIA, I. M. B. **Medição da radiação solar global e difusa utilizando piranômetro com sensores fotovoltaicos**. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Meteorologia) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - RS, 2008.

VILELA, W. A. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar**. 178f. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, 2010.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DNNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparisons of models . **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 5, p. 8995 - 9005, 1985.

WMO. **Guide to meteorological Instruments and methods of observation**. [S.I.], World Meteorological Organization, 2008.

APENDICE A

Apêndice A. Instrumentação meteorológica utilizada no experimento.

<p>(a)</p>	<p>Sensor: Saldo radiômetro CNR4 (<i>Kipp e Zonen Delft, Inc., The Netherlands</i>) adotado como referência.</p> <p>Utilização: Saldo de radiação (R_n); Determinação do componente: (R_s)</p> <p>Instalação: a 1,5 m de altura.</p>
	<p>Sensor: Piranômetro CS300 (<i>Apogee Instruments</i>)</p> <p>Utilização: radiação incidente (R_s)</p> <p>Instalação: a 1,5 m de altura.</p>
	<p>Sensor: Piranômetro SP-Lite (<i>Kipp & Zonen, Delft, Inc., The Netherlands</i>)</p> <p>Utilização: radiação incidente (R_s)</p> <p>Instalação: a 1,5 m de altura.</p>
	<p>Sensor: Piranômetro LP-02 (<i>Hukseflux</i>)</p> <p>Utilização: radiação incidente (R_s)</p> <p>Instalação: a 1,5 m de altura.</p>
	<p>Sensor: Piranômetro LI200X (<i>LICOR Biosciences, Inc., Lincon, NE, USA</i>)</p> <p>Utilização: radiação incidente (R_s)</p> <p>Instalação: a 1,5 m de altura.</p>

	<p>Sensor Termohigrômetros (HMP60, Vaisala, Inc. Helsinki, Finland).</p> <p>Utilização: Temperatura do ar (T_{ar}) e umidade relativa do ar (UR_{ar})</p> <p>Instalação: 2 m de altura do solo.</p>
	<p>Sensor: Anemômetro de concha e medidor da direção do vento 03002-L Wind Sentry Set (RM Young, inc., USA)</p> <p>Utilização: Velocidade e direção do vento</p> <p>Instalação: a 3 m de altura do solo</p>
	<p>Sensor: Pluviômetro de báscula TR-525M (Texas Eletronics, Inc., Dallas, TX, USA)</p> <p>Utilização: Precipitação pluviométrica</p> <p>Instalação: a 1 m de altura do solo.</p>
	<p>Datalogger CR 1000 (Campbell Scientific, Inc., USA)</p> <p>Utilização: Armazenagem de dados coletados pelos sensores.</p>

APENDICE B

Padrão internacional – ISO 9060 (1990): Lista de especificação de piranômetros.

Nº da Referência	Especificação	Categoria do Piranômetro		
		Padrão Secundário	1ª Classe	2ª Classe
1	Tempo de Resposta: tempo para 95% da resposta	< 15 s	< 30 s	< 60 s
2	Compensação do ponto zero: (a) resposta a 200 W.m ⁻² para radiação térmica líquida (ventilado).	+ 7 W.m ⁻²	+ 15 W.m ⁻²	+ 30 W.m ⁻²
	(b) resposta à mudança de 5K/h na temperatura ambiente.	± 2 W.m ⁻²	± 4 W.m ⁻²	± 8 W.m ⁻²
3a	Não-Estabilidade: Mudança na porcentagem na resposta no ano.	± 0,8 %	± 1,5 %	± 3 %
3b	Não-Linearidade: Desvio percentual da resposta em 500 W.m ⁻² devido à mudança na irradiância dentro de 100 W.m ⁻² a 1000 W.m ⁻² .	± 0,5%	± 1 %	± 3 %
3c	Resposta Direcional (para radiação direta): a faixa de erros causada pela pretensão de que a resposta à incidência normal é válida para todas as direções quando medindo de uma direção um feixe de radiação de que a irradiância incidente normal é 1000 W.m ⁻² .	± 10 W.m ⁻²	± 20 W.m ⁻²	± 30 W.m ⁻²
3d	Seletividade Espectral: Desvio percentual do produto da absorvência espectral e transmitância espectral da média correspondente entre 350 nm e 1500 nm.	± 3 %	± 5 %	± 10 %
3e	Resposta à Temperatura: Desvio percentual devido à mudança na temperatura ambiente dentro de um intervalo de 50K.	2 %	4 %	8 %
3f	Resposta à Inclinação: Desvio percentual da resposta para a inclinação 0° a 90° na irradiância de 1000 W.m ⁻² .	± 0,5%	± 2%	± 5%

CAPÍTULO 2

ESTIMATIVA DO BALANÇO DE RADIAÇÃO EM ÁREA DE GRAMÍNEA COM GRAU DE COBERTURA VARIÁVEL

Estimativa do balanço de radiação em área de gramínea com grau de cobertura variável

Autora: Nara Tosta Santos

Orientador: Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira

Coorientadora: Profa Dra. Valéria Peixoto Borges

RESUMO: A determinação do saldo de radiação pode ser feita medindo-se ou estimando-se os componentes de onda curta e onda longa da radiação. Apesar da importância do saldo de radiação (R_n) em estudos agrometeorológicos, esta variável não é medida frequentemente em estações meteorológicas e poucos dados históricos são disponíveis na maioria das redes de estações padrões. O objetivo do presente trabalho foi estimar o R_n em função da radiação solar incidente (R_s) e do saldo de radiação de onda curta (R_{ns}) em uma área de gramínea com grau de cobertura variável para as condições locais. O estudo foi desenvolvido em área experimental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, situada no município de Cruz das Almas – BA, ($12^{\circ}44'39''$ S; $39^{\circ}06'23''$ W, 225 m de altitude) no período de 101 dias. O ajuste dos parâmetros dos modelos foi realizado com base em uma série de 84 dias, de R_n , R_s e R_{ns} medidos pelo instrumento CNR4. Uma segunda série de dados com 17 dias foi utilizada para validar as equações geradas. Também foi determinado o grau de cobertura do solo ao longo do tempo. Foram obtidos modelos com elevado r^2 (acima de 0,97) e baixos erros no teste entre valores medidos e estimados, indicando boa precisão para a estimativa do saldo de radiação em gramínea, em função de R_s e R_{ns} . Conclui-se que o R_n pode ser estimado por meio de R_s e R_{ns} com precisão suficiente para fins de modelagem.

PALAVRAS CHAVES: radiação solar incidente, saldo radiômetro, *Brachiaria decumbens*.

Estimation of net radiation over grass with varying ground cover

Author: Nara Tosta Santos

Advisor: Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira

Co-Advisor: Prof. Dra. Valéria Peixoto Borges

ABSTRACT: The determination of net radiation can be made by measuring or estimating the wave components short and long wave radiation. Despite the importance of net radiation (R_n) in agrometeorological studies, this variable is not often measured in few weather stations and historical data are available in most standard station networks. The aim of this study was to estimate the R_n as a function of incident solar radiation (R_s) and short wave radiation balance (R_{ns}) on a grassy area with differing levels of coverage for local conditions. The study was conducted in the experimental area of the University Federal Recôncavo de Bahia, located in Cruz das Almas - BA, (12°44'39" S; 39°06'23" W, 225 m) within 101 days. The setting of the parameters of the models was based on a series of 84 days, R_n , R_s and R_{ns} measured by CNR4 instrument. A second set of data 17 days was used to validate the generated equations. Also determined was the extent of ground cover over time. Models were obtained in high r^2 (above 0.97) and low errors in the test between measured and estimated values, indicating good precision for estimating the net radiation in grass, R_s and R_{ns} function. It concludes that the R_n can be estimated by R_s , R_{ns} and with sufficient accuracy for modeling purposes.

KEY-WORDS: Global solar radiation, net radiometer, *Brachiaria decumbens*.

INTRODUÇÃO

O saldo de radiação (R_n) também denominado de radiação líquida exerce um papel fundamental que influencia os processos na interface solo-planta-atmosfera, pois define a energia disponível para os processos que ocorrem na superfície (OCAMPO & RIVAS, 2013).

As trocas radiativas à superfície varia temporal e espacialmente e, por consequência, a intensidade do saldo de radiação, dependem da inclinação dos raios solares bem como das características da superfície analisada, de acordo com o coeficiente de reflexão (albedo), por sua vez, dependem do tipo de vegetação, do grau de cobertura e do tipo de solo, das condições de temperatura, nebulosidade e umidade do ar (SENTELHAS & NASCIMENTO, 2003; CAMPBELL & DIAK, 2005).

O albedo desempenha um papel fundamental nas condições microclimáticas locais, pois influencia diretamente a energia disponível na interface superfície-atmosfera para os processos de aquecimento, evapotranspiração e fotossíntese (WANG et al., 2007). É indispensável para caracterizar o microclima do dossel de plantas e estimar a evapotranspiração (DANTAS et al., 2003).

A determinação da medida direta do R_n pode ser realizada por meio de instrumento denominado saldo radiômetro, que possuem sensores tanto para ondas curtas como para ondas longas e já fornecem valores calculados dos saldos energéticos (saldo de ondas curtas, ondas longas e saldo de radiação total) (BLONQUIST JÚNIOR et al., 2009).

Apesar da disponibilidade destes instrumentos, vários autores argumentam que a medida de R_n não é usualmente realizada em estações meteorológicas, uma vez que depende muito da natureza da superfície e, portanto, sofre grande influência do albedo e temperatura da superfície, essas medições são representativas de áreas de pequena dimensão e boa homogeneidade (MONTEITH & UNSWORTH, 1990; ALADOS et al., 2003). Existem poucos dados históricos de R_n disponíveis na maioria das redes de estações padrões, sendo encontradas mais facilmente medições rotineiras de R_s , em virtude disso, o R_n é frequentemente estimado por diversas maneiras.

A metodologia padrão para estimar o saldo de radiação é a recomendada pela FAO (ALLEN et al., 1998) no entanto, este método apresenta algumas dificuldades, principalmente na estimativa do saldo de radiação de ondas longas (R_{nl}). A estimativa do saldo de radiação de ondas curtas (R_{ns}) é relativamente simples, uma vez que são requeridos apenas dados de R_s e albedo, Já a estimativa do R_{nl} é bem mais complexa, geralmente obtida pela estimativa dos seus dois componentes separadamente, mediante a lei de Stefan-Boltzman com o conhecimento da emissividade (ALLEN et al., 1998).

Para minimizar esse problema, em virtude da complexidade da estimativa do R_{nl} , foram propostas equações capazes de estimar R_n em culturas agrícolas e tipos de vegetação por meio de relações lineares com R_s ou R_{ns} (KUSTAS et al., 1994; PEREIRA et al., 1998; ALADOS et al., 2003; ALMEIDA et al., 2003; KJAERGAARD et al., 2007; SILVA et al., 2007; FIETZ & FISCH 2009), o que torna determinação de R_n mais simples e, principalmente, aplicável em sistemas operacionais, nos quais conta-se apenas com medições das estações automáticas instaladas em condições padronizadas.

O objetivo do presente trabalho foi estimar o saldo de radiação em função da radiação solar incidente e do saldo de radiação de onda curta em uma área de gramínea com grau de cobertura variável, para as condições do município de Cruz das Almas-BA.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização do experimento

O presente estudo foi desenvolvido na área experimental da UFRB - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, campus universitário de Cruz das Almas, Bahia (12°44'39" S; 39°06'23" W, 225 m). O clima é do tipo úmido a subúmido, com umidade relativa média de 80% e temperatura média anual de 24,1°C, apresentando pluviosidade média anual de 1.170 mm (ALMEIDA, 1991). De acordo com a classificação de Köppen, enquadra-se no tipo Aw a Am (BAPTISTA & OLIVEIRA, 1998).

A área do experimento foi escolhida por apresentar características desejadas como: facilidade de acesso, tipo de cobertura vegetal, amplo horizonte, livre de obstáculos (árvores, edificações, dentre outros) que pudessem sombrear os instrumentos e prejudicar a medição da radiação solar bem como o fluxo de vento, o que certamente iria dificultar a obtenção de leituras confiáveis das variáveis meteorológicas. A confiabilidade das medidas em geral depende das condições locais adequadas onde o sistema está instalado, da qualidade da instrumentação utilizada e da calibração dos sensores.

A área do experimento possui topografia plana e dimensão de 42 m x 42 m (1764 m²), no qual foi cercada de maneira a garantir a segurança e a integridade física dos instrumentos evitando o acesso de animais e pessoas não autorizadas. Os instrumentos e equipamentos de coleta de dados foram instalados no quadrante nordeste (QNE) da área experimental.

O solo da área experimental é caracterizado como Latossolo Amarelo. O local do estudo era predominantemente coberto com gramínea de porte baixo (*Brachiaria decumbens*). Esta gramínea, na fase inicial do estudo, foi retirada da área delimitada, através da capina manual para acompanhar o grau de cobertura do solo ao longo do tempo.

Instrumentos utilizados no experimento

Uma vez delimitada a área experimental, utilizou-se uma bússola para definir a direção do norte verdadeiro, subtraindo-se do norte magnético a declinação magnética local para aquela data.

Os equipamentos utilizados no experimento eram novos, nunca haviam sido utilizados, portanto, permanecia com calibração de fábrica, cuja metodologia de calibração é geralmente apresentada nos respectivos manuais.

Para medição da radiação solar incidente (R_s), o saldo de radiação de ondas curtas (R_{ns}) e o saldo de radiação (R_n) foi utilizado um saldo radiômetro CNR4 (*Kipp & Zonen B.V. Delft, The Netherlands*).

Adicionalmente, utilizou-se um sensor para medir a umidade relativa e a temperatura do ar, um sensor para a velocidade e direção do vento e um sensor para precipitação pluviométrica.

A temperatura do ar e umidade relativa do ar foi medida por um termohigrômetro HMP60 (*Vaisala, Inc. Helsinki, Finland*). Esse sensor ficou dentro de um abrigo meteorológico com o intuito de evitar a exposição direta dos elementos sensores aos raios solares e à chuva, além de garantir a livre circulação do ar permitindo um equilíbrio com a atmosfera a sua volta. Esse conjunto sensor foi instalado no lado oposto aos sensores de radiação a 2 metros do solo, seguindo as normas da Organização Mundial de Meteorologia – OMM (WMO, 2008).

A velocidade e direção do vento foi medida por meio de um anemômetro de concha, modelo 03002 Wind Sentry Set (*RM Young, inc., USA*) instalado a 3 m de altura do solo.

A precipitação pluviométrica foi medida por meio de um pluviômetro de balança modelo TE-525MM (*Texas Eletronics, Inc., Dallas, TX, USA*) instalado a 0,5 m de altura do solo.

Estrutura de suporte e coleta de dados

O conjunto instrumental utilizado nesse estudo foi instalado seguindo as recomendações dos manuais dos sensores, com orientação norte para evitar a presença de sombras na área onde se encontram as instalações dos instrumentos de medição.

No centro do quadrante, QNE instalou-se um suporte para os instrumentos com 1,5 m de altura, constituído de uma barra metálica de 2,5 m de comprimento, em tubo de aço galvanizado (25 mm diâmetro), apoiada em dois tripés do mesmo material (Figura 1). Foi necessário ancorar a barra metálica com cabos para dá firmeza a estrutura principalmente devido às vibrações provocada pela ação do vento.



Figura 1. Área experimental com a estrutura metálica de suporte para os sensores utilizados.

O saldo radiômetro foi conectado a barra por um suporte individual e cuidadosamente nivelado em relação ao solo, sendo adotado um procedimento cuidadoso para evitar a perturbação na superfície onde o sensor estava posicionado.

De acordo com o manual do saldo radiômetro CNR4 foi instalado a 1,5 m de altura, conforme orientação do fabricante para evitar os efeitos de sombreamento do instrumento no solo com alturas menores, que consequentemente provocaria uma má qualidade de medição das variáveis estudadas.

Para a aquisição e armazenamento de dados todos os sensores já mencionados foram conectados ao sistema acumulador de dados, denominado datalogger modelo CR1000 (*Campbell Scientific Inc, Logan, UT, EUA*). O mesmo foi programado para registrar o sinal dos sensores conectados aos terminais, fazer o processamento do sinal, digitalizar e armazenar na memória, gerando assim uma tabela de dados com indicação do número de medição, data e hora. Posteriormente estas informações foram transferidas para um computador através de conexão USB.

A leitura dos dados no datalogger foi definida a partir dos registros a cada 5 segundos, e o armazenamento dos dados gerados foram agrupados em médias e totais a cada 60 minutos.

Como os instrumentos estavam em área remota, foram utilizados painéis solares para fornecer energia elétrica à bateria recarregável, e assim manter os sensores também no período noturno e em dias nublados. O sistema é alimentado por meio de bateria interna, que permite manter o relógio em funcionamento e manter em memória o programa e os dados se for desligado da corrente. A memória, os canais de entrada e saídas foram controlados por um sistema operacional, em conjunto com o programa de interface ao usuário PC200W.

A rotina de manutenção dos instrumentos no campo durante o experimento incluiu a verificação do funcionamento, o estado de conservação dos sensores, o nivelamento, a limpeza nas cúpulas dos piranômetros, principalmente depois da ocorrência de chuva e a verificação semanal da carga elétrica da bateria estacionária.

O início da tomada de dados válidos foi no dia 02 de julho de 2014 terminando em 10 de outubro de 2014, totalizando 101 dias de coleta. Os resultados obtidos de R_s , R_{ns} e R_n foram expressos em ($W m^{-2}$) na escala horária e integrados para ($MJ m^{-2}$) na escala diária.

O intervalo de dados válidos compreende o período de 02 de julho de 2014 terminando em 10 de outubro de 2014, totalizando 101 dias de coleta. Os resultados obtidos de R_s , R_{ns} e R_n foram expressos em ($W m^{-2}$) na escala horária e integrados para ($MJ m^{-2}$) na escala diária.

Grau de cobertura do solo

Foi realizado um acompanhamento do grau de cobertura do solo longo do experimento, por meio de imagens da vegetação em oito pontos dentro da área, escolhidos aleatoriamente. Os índices de cobertura de solo foram gerados a partir de uma área conhecida de um quadrado (30x30cm) sobre o solo onde a fotografia foi obtida e posteriormente foi utilizado o Image J 1.48v, software livre de processamento de imagens em linguagem Java, que forneceu apenas a área da vegetação fotossinteticamente ativa. As imagens foram

tiradas de quatro em quatro dias, durante 100 dias, totalizando 26 tomadas de fotografias.

Utilizou-se o modelo de Gompertz para estimar o grau de cobertura do solo (GC, %) em função do tempo, em dias, em que não foram registradas imagens.

Análise dos dados

Antes de submeter os dados experimentais a uma análise estatística e comparativa, foi realizada uma análise de qualidade para detectar e filtrar possíveis medidas discrepantes, visando obter um conjunto de dados representativos, com ênfase nos valores de R_s , R_{ns} e R_n . Para fins de cálculo, foram efetuadas as integrações dos totais de R_n , R_s e R_{ns} do período diurno, obtendo-se também a relação entre essas variáveis para cada hora. Foram utilizados somente os valores das 8 h às 17 h em virtude de que nos períodos anteriores às 8 h da manhã e após as 17 h são comuns valores negativos de R_n , o que resultaria em uma soma errônea dos valores.

Com base na metodologia de Iqbal (1983), foi feita a caracterização de dias de céu com poucas nuvens ou céu claro por meio do índice de claridade (K_t). É um indicador das condições de transmissividade atmosférica, onde valores de K_t inferiores a 0,3 sinalizam uma atmosfera nublada, valores superiores a 0,7, sinalizam atmosferas bastante claras e valores de 0,3 a 0,7 sinalizam atmosferas parcialmente nubladas. A radiação solar incidente no topo da atmosfera (R_a) foi estimada com o auxílio do programa computacional REF-ET (ALLEN, 2013). O índice de claridade foi definido pela equação 1.

$$K_t = \frac{R_s}{R_a} \quad (1)$$

em que: R_s – radiação solar incidente diária (MJ m^{-2}); R_a – radiação solar incidente diária no topo da atmosfera diária (MJ m^{-2}).

A radiação solar incidente no topo da atmosfera foi obtida com base na equação 2:

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (2)$$

em que:

G_{sc} - constante solar = $0.0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$; d_r - distância relativa Terra-Sol; ω_s - ângulo horário no pôr do sol em radianos; φ - latitude; δ - declinação solar.

Dois tipos de equações para estimativa do saldo de radiação foram avaliados:

$$R_n = a_1 + R_s \cdot b_1 \quad (3)$$

$$R_n = a_2 + R_{ns} \cdot b_2 \quad (4)$$

O período de medidas para geração dos modelos foi de 84 dias e o período de medidas para a validação dos modelos foi de 17 dias. Ambos escolhidos aleatoriamente na série de dados entre os dias 02 de julho até 10 de outubro de 2014.

O modelo que utiliza como variável de entrada o saldo de ondas curtas foi gerado para todo o período de dados e em seguida, foi separado em quatro agrupamentos de dados baseado nos percentuais de grau de cobertura no solo (0-25%; 25-50%; 50-75% e 75-100%).

Para gerar os modelos, o procedimento realizado foi plotou-se no eixo x os valores medidos de radiação solar incidente e o saldo de radiação de ondas curtas e no eixo y os valores medidos do saldo de radiação determinado pelo sensor CNR4, para obtenção dos coeficientes da equação linear ($y = ax + b$). Após a obtenção das equações de regressão foram feitas as validações das mesmas, utilizando-se a série de dados independentes.

As análises estatísticas, os cálculos, a confecção de gráficos e tabelas foram feitos utilizando-se a planilha eletrônica. Foram aplicados índices estatísticos para avaliar o desempenho dos modelos de estimativa do saldo de radiação, tais como: o desvio padrão de estimativa (SEE) (Equação 5), o coeficiente de determinação (r^2) (Equação 6).

$$SEE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^{0,5}}{n-1} \quad (5)$$

$$r^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

em que: y_i – valores estimados; x_i – valores medidos; \bar{x} - valor médio medido; \bar{y} - valor médio estimado.

Para análise do desempenho dos dois modelos gerados foi realizada uma comparação entre os valores medidos e valores estimados. O método de comparação usado neste trabalho foi o uso de indicadores estatísticos mais comumente presentes na literatura, tais como MBE (*Mean bias error*), RMSE (*Root mean square error*) e o índice de concordância de Willmott (d_w) (1985).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (8)$$

em que: y_i - valores estimados de R_n , x_i - valores medidos de R_n , n é o número de observações, \bar{X} - valor médio medido.

O indicativo MBE representa o desvio das médias e provê informações sobre a performance do modelo quanto a sua subestimação ou superestimação. Um valor positivo indica uma superestimação, enquanto que um valor negativo subestimação, quanto menor o valor absoluto de MBE melhor é a performance do modelo testado (STONE, 1993). A raiz quadrada do desvio quadrático médio RMSE fornece informação do desempenho do modelo

quanto sua dispersão em torno da linha de tendência. Quanto menor seu valor, menor a dispersão dos dados em torno do modelo. A desvantagem é que bastam alguns poucos valores discrepantes para que ocorra um aumento significativo em sua magnitude. O RMSE é um indicador que estima bem o erro sistemático de um modelo.

O índice de concordância de Willmott (d_w) (1985) foi calculado para avaliar a exatidão das medidas. O índice de concordância, pode variar entre 0 e 1 para nenhuma concordância e para uma concordância perfeita, respectivamente (Equação 9).

$$d_w = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x)^2}{\sum_{i=1}^n \left[\left((y_i - \bar{x}) \right)^2 + \left((x_i - \bar{x}) \right)^2 \right]} \right] \quad (9)$$

em que:

y_i - radiação solar medida pelos piranômetros avaliados; x - radiação solar medida pelo piranômetro considerado padrão; \bar{x} - média da radiação solar medida.

A utilização dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e o índice de ajustamento “d”, em conjunto, podem ser considerados uma boa alternativa para validação de modelos estatísticos pois permitem uma análise simultânea do desvio da média identificando a ocorrência de sub ou superestimativa, dispersão e ajustamento do modelo, em relação às medidas (SOUZA & ESCOBEDO, 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Condições atmosféricas e de superfície durante o experimento

Durante o experimento, a temperatura média diária do ar oscilou da mínima de 19,7°C à máxima de 24,6°C, com média de 21,9°C; a umidade relativa do ar com oscilações de 73,8% a 92,6%, com média 84,5% (Figura 2).

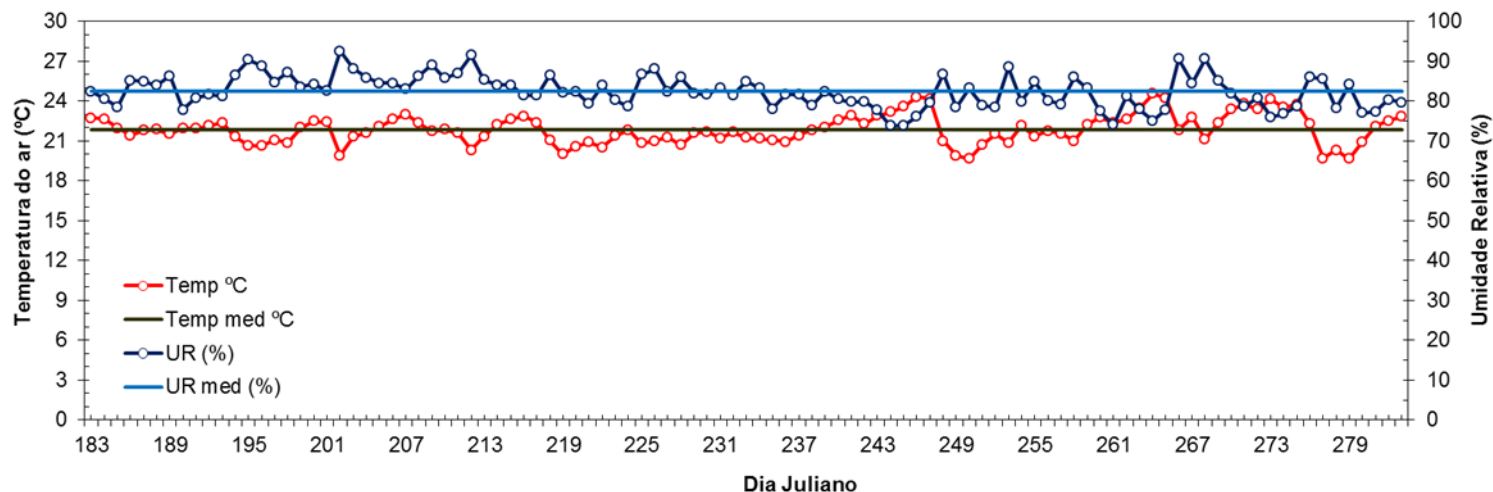


Figura 2. Temperatura do ar e umidade relativa do ar diária durante o período do experimento.

Na Figura 3 é apresentada a variação da transmissividade atmosférica e o comportamento da precipitação pluviométrica ao longo do estudo.

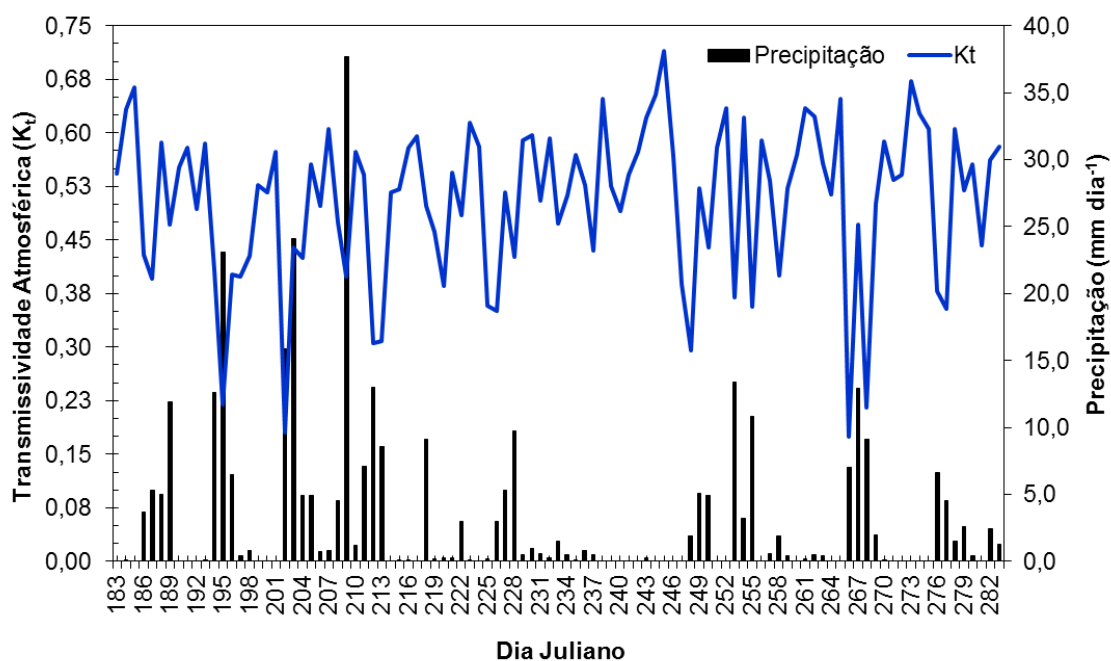


Figura 3. Variação da transmissividade atmosférica e da precipitação acumulada (mm dia^{-1}) durante o período experimental, em uma área de gramínea em Cruz das Almas-BA.

A região de Cruz das Almas destaca-se por ocorrências de precipitações ao longo do ano, com maior concentração nos meses de abril a julho. A precipitação total para o período de estudo (02/07 a 10/10/2014) foi de 324,1 mm.

A nebulosidade nesse período de estudo foi classificada com base na metodologia de Iqbal (1983), por meio da transmissividade (K_t). Em 95 dias os valores de K_t oscilaram de 0,3 a 0,7, ou seja, atmosfera parcialmente nublada; totalizando 94% do período estudado. Apenas em único dia (02/09/2014) a atmosfera foi céu claro. No restante do período (5 dias) a atmosfera foi nublada, o que caracteriza céu menos transparente, contribuindo que a radiação solar incidente (R_s) seja mais espalhada na atmosfera, portanto, com predomínio de radiação difusa.

A nebulosidade da atmosfera afeta diretamente a disponibilidade de energia, ou seja, quanto maior a nebulosidade (DJ = 202) menor a disponibilidade de energia para os processos biofísicos, (Figura 4a). De acordo com a figura, observa-se que R_s e R_n segue o mesmo comportamento, ambas em relação a curva de R_a . Já nas condições de parcialmente nublado (DJ = 237) a variação diária de R_s e R_n caracterizou-se por apresentar bruscas variações ao longo do dia (Figura 4b). Em dia de céu claro (DJ = 245) ocorreu uma tendência de flutuações suaves no curso diário de R_n (Figuras 4c).

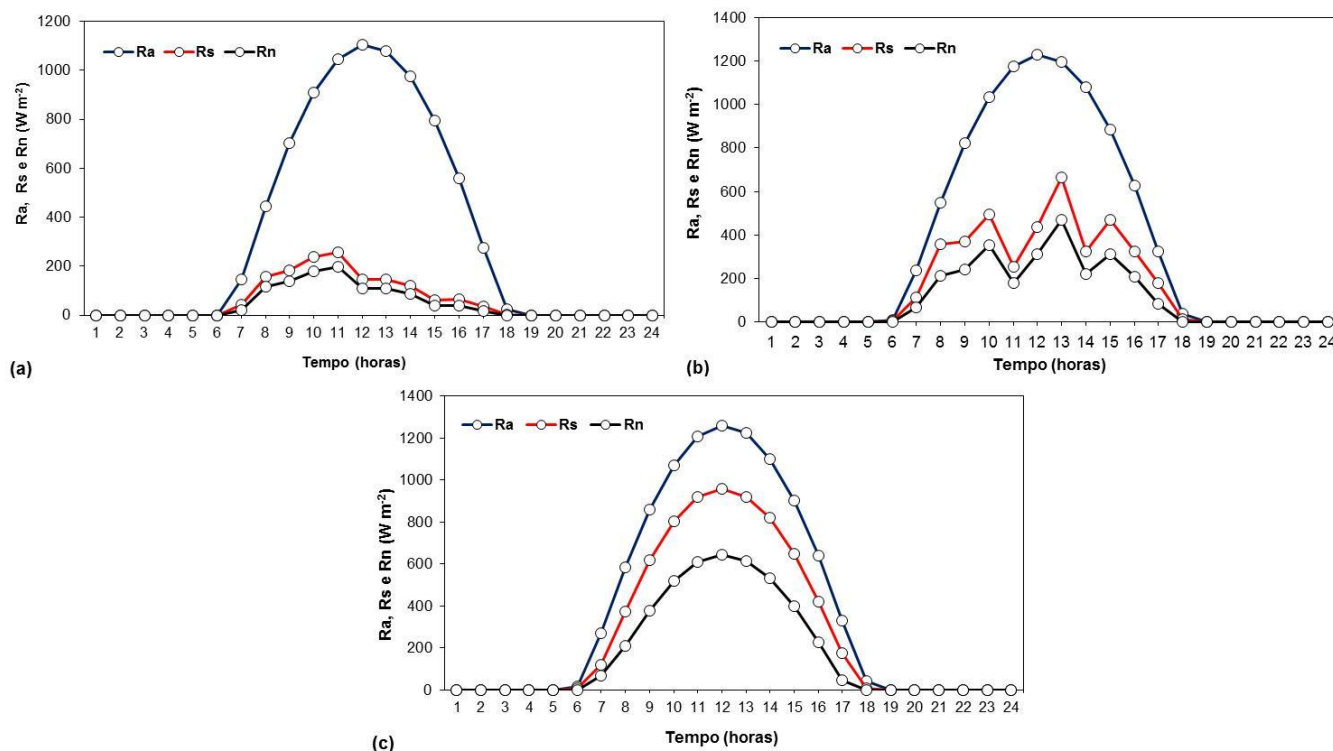


Figura 4. Variação horária da radiação no topo da atmosfera (R_a), radiação solar incidente (R_s) e saldo de radiação (R_n) em gramínea nos dias juliano 202 (a), 237 (b) e 245 (c).

O saldo de radiação (R_n) como esperado, seguiu as variações do saldo de radiação de onda curta (R_{ns}), que correspondentemente seguiu as variações da radiação solar incidente (R_s). Observou-se que R_s variou de 5,1 a 24,2 MJ m⁻² dia⁻¹, o saldo de radiação de onda curta (R_{ns}) variou de 4,2 a 19,4 MJ m⁻² dia⁻¹, enquanto que o R_n variou de 3,7 a 16,4 MJ m⁻² dia⁻¹ no período de 02/07 a 10/10/2014. Desta maneira, observa-se, ainda, que o R_n apresentou uma proporção de R_s (relação R_n/R_s), em torno de 68% enquanto que, o R_n apresentou uma proporção do R_{ns} (relação R_n/R_{ns}), em torno de 85% (Figura 5). Em Piracicaba-SP, Silva et al. (2007) verificaram as relações entre a R_s e o R_n sobre superfícies vegetadas com capim tânzania e grama batatais, foram iguais a 53 e 54% da R_s , respectivamente.

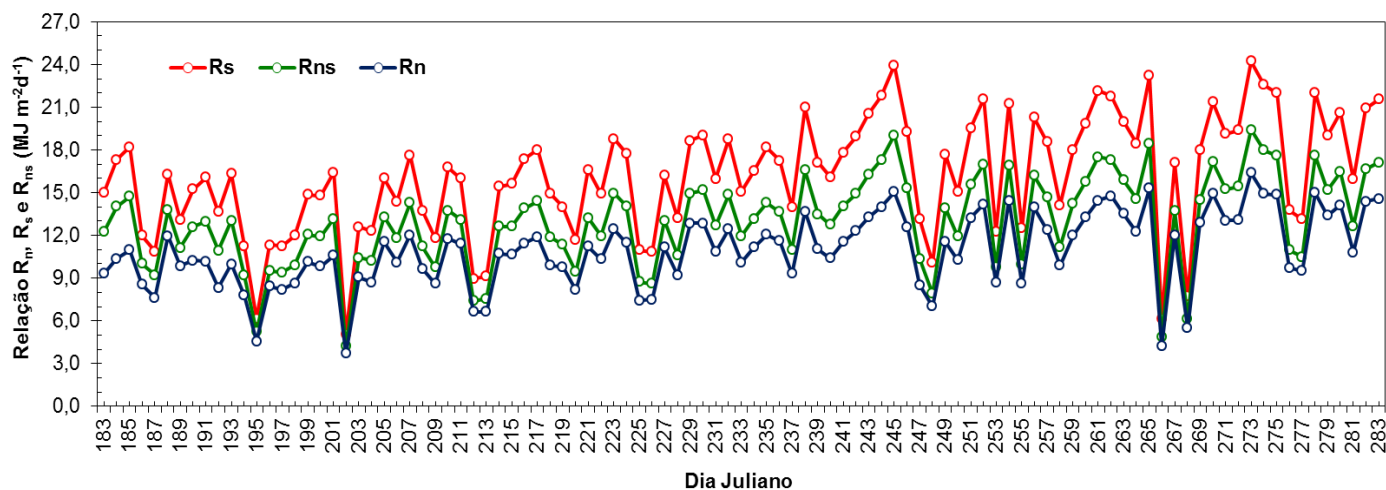


Figura 5. Radiação solar incidente (R_s), saldo de radiação de ondas curtas (R_{ns}) e saldo de radiação (R_n) em gramínea, no período de 02/07 a 10/10/2014 em Cruz das Almas-BA.

A cada 4 dias foram registradas imagens da superfície para avaliar o grau de cobertura da mesma ao longo do tempo. Para determinar o grau de cobertura diariamente, utilizou-se do modelo de Gompertz, que relaciona o grau de cobertura em função do tempo, ou seja, por meio da equação durante o período de estudo pode-se entrar na mesma com o dia e obter a estimativa da cobertura da superfície (Figura 6).

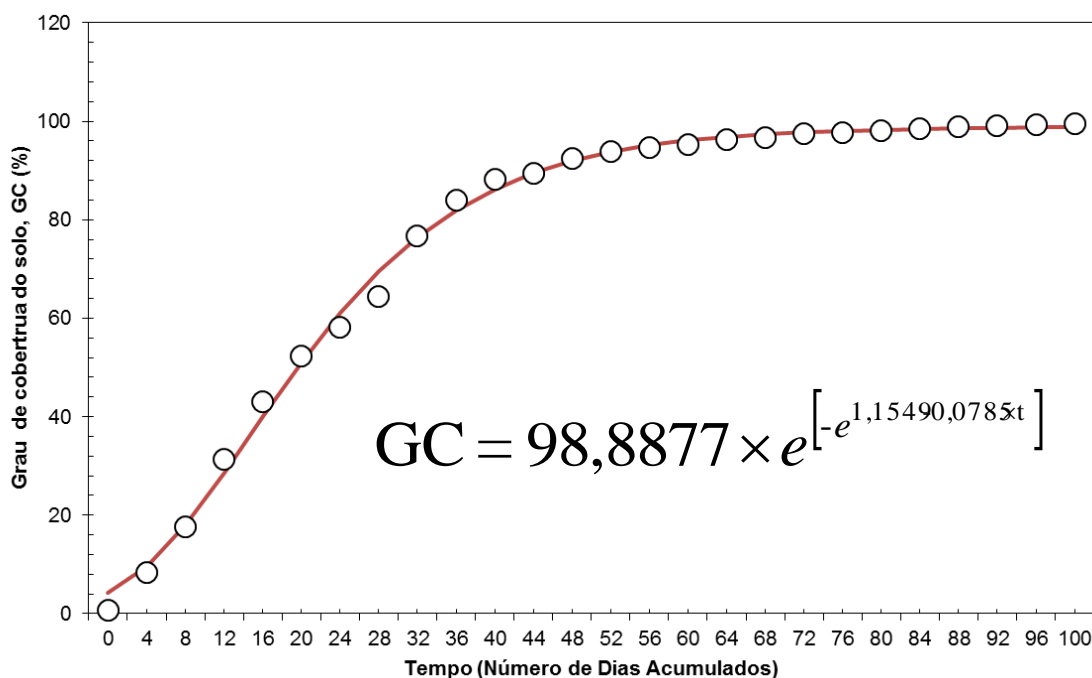


Figura 6. Ajuste do grau de cobertura do solo (GC, %) em área de gramínea em função do tempo (número de dias acumulados - DAC), durante o período de 02/07 a 10/10/2014 em Cruz das Almas-BA.

Relação entre radiação solar incidente e do saldo de radiação

O modelo de estimativa do saldo de radiação gerado a partir da variável independente radiação solar incidente apresentou correlação com alto coeficiente de determinação. Esta relação é muito boa para valores baixos de radiação solar incidente, evidenciado pela aproximação da reta 1:1, e que à medida que a radiação solar incidente aumenta o saldo de radiação aumenta, em proporção menor, justificado pelo distanciamento da reta de regressão em torno da reta 1:1, ou seja, o saldo de radiação não segue mesmo curso de R_s . De acordo com a análise das relações R_a/R_s e R_n/R_s , pode-se afirmar que os desvios da reta de regressão em relação à reta 1:1 aumentam muito para valores de $K_t > 0,3$.

Na Figura 7, mostra-se a equação de regressão, desvio padrão da regressão (SEE) e o coeficiente de determinação para relação entre R_n e R_s . O SEE foi de $22,66 \text{ W m}^{-2}$, correspondendo a 7,2% do valor médio ($312,5 \text{ W m}^{-2}$) do saldo de radiação.

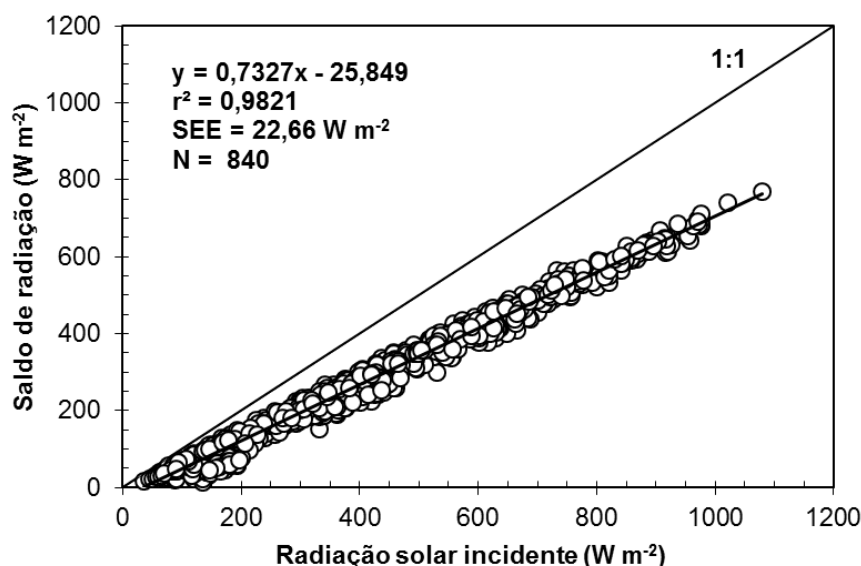


Figura 7. Comportamento dos dados horários do saldo de radiação e radiação solar incidente ($W m^{-2}$) no período de 84 dias.

A validação do modelo de estimativa de R_n foi baseada no conjunto de dados independentes com 17 dias (170 valores horários). Pela análise de regressão linear simples aplicada a estes dados, constata-se que os valores medidos e estimados do saldo de radiação estão altamente correlacionados.

Estes resultados corroboram outros trabalhos (AZEVEDO et al., 1997; SENTELHAS & NASCIMENTO, 2003) em que R_n apresenta alta correlação com R_s , tanto para períodos curtos (dias, semanas) quanto para períodos longos (meses), confirmando haver dependência linear entre essas variáveis. Assim sendo, o modelo apresentou-se excelente para a localidade analisada comprovado pela sua precisão (reta de tendência) como pela sua exatidão (dispersão dos dados em torno da reta 1:1) (Figura 8).

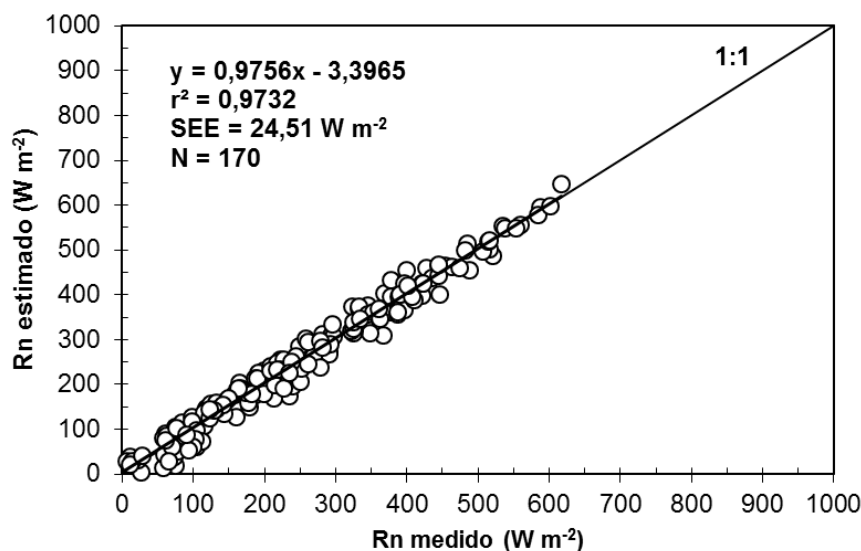


Figura 8. Comportamento dos dados horários do saldo de radiação estimado pela radiação solar incidente e o saldo de radiação medido (W m^{-2}) no período de 17 dias.

De acordo com o índice Willmont (d_w), observou-se alta exatidão para o modelo de estimativa de R_n em função da R_s , apresentando índice d_w igual a 0,993. O MBE foi de $20,8 \text{ W m}^{-2}$, enquanto que o RMSE foi de $24,84 \text{ W m}^{-2}$, correspondeu a 7,8% e 9,36% respectivamente do valor médio ($265,3 \text{ W m}^{-2}$) do saldo de radiação. Os valores obtidos pelos indicadores estatísticos confirmam que o R_n pode ser estimado com base em R_s , visto os elevados coeficientes de determinação obtidos, tanto na geração quanto na validação do modelo e principalmente os baixos valores de MBE e RMSE e o alto valor do coeficiente de exatidão.

O resultado encontrado no presente trabalho é de importância prática, visto que de forma geral, o R_n não é medido na maioria das estações meteorológicas devido ao alto custo de aquisição e manutenção dos saldo radiômetros. Em trabalhos realizados por (SILVA et al., 2007; FIETZ & FISCH, 2009; HELDWEIN et al., 2012ab; LIMA et al., 2014) constataram que a radiação solar incidente apresentou um bom ajuste quando comparado com o saldo de radiação.

Relação entre saldo de radiação de onda curta e do saldo de radiação

O modelo de estimativa do saldo de radiação gerado a partir da variável independente saldo de radiação de onda curta (R_{ns}), semelhantemente ao modelo com base em radiação solar incidente, apresentou alto coeficiente de determinação ($r^2 = 0,99$). Observa-se que nesse modelo é levado em consideração o parâmetro da superfície (albedo). O albedo desempenha um papel fundamental nas condições microclimáticas locais, uma vez que, este índice é específico para cada tipo de superfície, pois influencia diretamente a energia disponível na interface superfície-atmosfera para os processos de aquecimento, evapotranspiração e fotossíntese (WANG et al., 2007).

O R_n apresenta alta correlação com R_{ns} , confirmando haver dependência linear entre essas variáveis, comportamento evidenciado pela aproximação da reta de regressão em torno da reta 1:1. Em análise semelhante realizada no modelo com base na radiação solar incidente, observa-se que para valores baixos do saldo de radiação de ondas curtas, têm-se uma aproximação maior entre as retas, porém à medida que a R_{ns} aumenta, ocorre um pequeno distanciamento da reta de regressão em torno da reta 1:1. Ressalta-se na Figura 9, a equação de regressão, desvio-padrão da regressão, coeficiente de determinação.

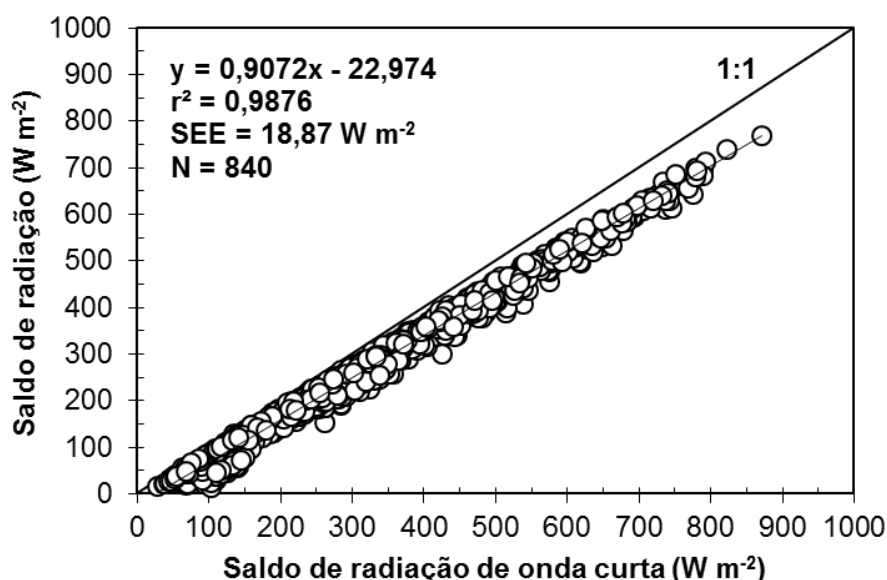


Figura 9. Comportamento entre os dados horários do saldo de radiação e saldo de radiação de ondas curtas ($W m^{-2}$), no período de 84 dias.

A validação do modelo de estimativa de R_n foi baseada no conjunto de dados independentes com 17 dias (170 valores horários). Pela análise de regressão linear simples aplicada a estes dados, (Figura 10), constata-se que os dados medidos e os valores estimados do saldo de radiação estão altamente correlacionados.

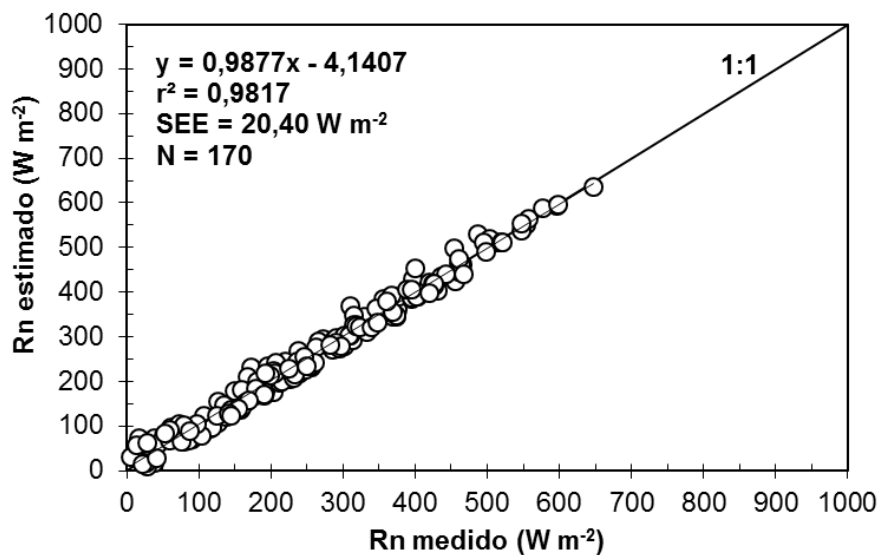


Figura 10. Comportamento dos dados horários de saldo de radiação estimado com base no saldo de radiação de onda curta e o saldo de radiação medido (W m^{-2}) no período de 17 dias.

Os valores obtidos neste estudo corroboram com trabalhos realizados por Kaminsky & Dubayah (1997) e Alados et al. (2003) afirmam que quando adicionou o parâmetro da superfície na parametrização, o modelo apresenta leve melhoria na estimativa do saldo de radiação, em comparação com o modelo que leva somente em consideração a radiação solar incidente. Porém, afirmam que a variabilidade espacial dos coeficientes tornam estas relações aplicáveis apenas a regiões com as mesmas características climáticas e geográficas.

A alta correlação observada entre o saldo de onda curta e o saldo de radiação aumenta a confiabilidade deste tipo de aproximação e mostra a importância das componentes de ondas curtas na estimativa de R_n (MURTAGH, 1976).

A importância deste estudo se reflete na facilidade de obter o saldo de radiação com mais facilidade e praticidade usando apenas o saldo de radiação de ondas curtas que justificado por Enoré (2012), que afirma que devido a dificuldade na obtenção do saldo de onda longa nas redes de estações meteorológicas, a contabilização do albedo, mostra-se ser boa opção para estimar R_n .

Considerando o índice d_w , observou-se alta exatidão para o modelo de estimativa de R_n em função da R_{ns} , a qual foi expressa pelo valor do índice d_w acima de 0,999. O MBE foi de $16,79 \text{ W m}^{-2}$, enquanto que o RMSE foi de $20,28 \text{ W m}^{-2}$, correspondeu a 6,33% e 7,65% respectivamente do valor médio ($265,3 \text{ W m}^{-2}$) do saldo de radiação. Os valores obtidos pelos indicadores estatísticos confirmam que o R_n pode ser estimado com base em R_{ns} , visto os elevados coeficientes de determinação obtidos, tanto na geração quanto na validação do modelo e principalmente os baixos valores de MBE e RMSE e alto valor de coeficiente de exatidão.

Observa-se pela análise da Figura 11 que o grau de cobertura do solo variou em função do tempo, conseqüentemente o albedo da superfície.

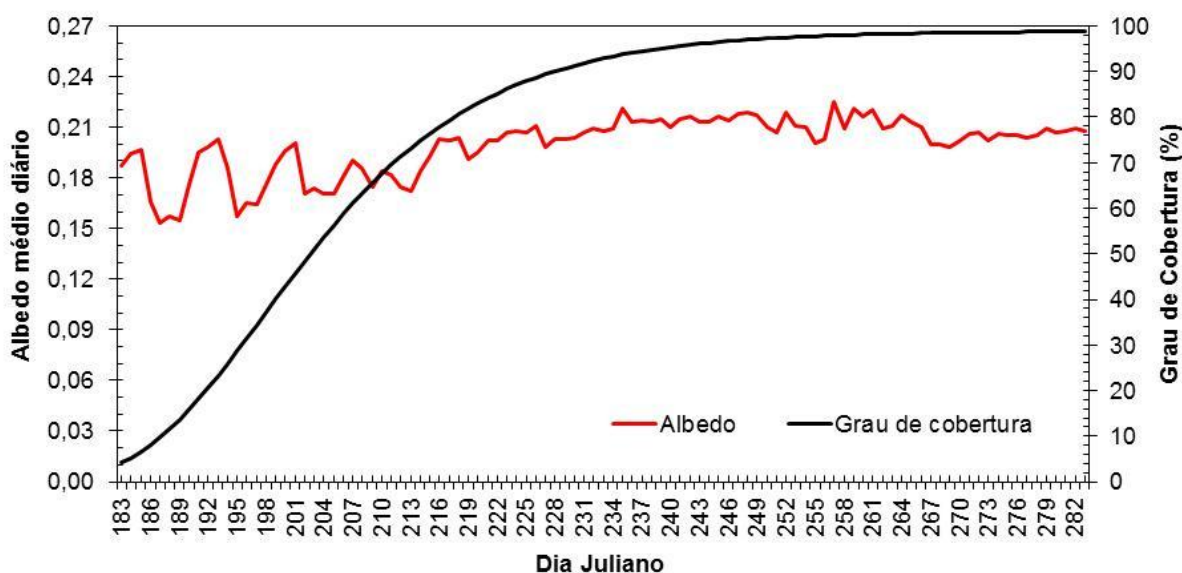


Figura 11. Comportamento do albedo médio diário e do grau de cobertura do solo da brachiaria durante o período de 02/07/2014 a 10/10/2014 em Cruz das Almas-BA.

Na fase inicial do experimento, o solo estava sem vegetação, sendo exposto diretamente aos raios solares, e devido a este fato, esperava-se um albedo alto, porém foram constatados valores de albedo baixos da ordem de 19%, esses valores se justificam devido ao albedo responder diretamente aos eventos de precipitação. O solo úmido pode apresentar uma variação de albedo entre 4% e 20% enquanto que, o solo seco uma variação maior entre 8% e 40% (JACOBS & VAN PUL, 1990).

Chia (1967) observou que o albedo do solo úmido totalmente descoberto é aproximadamente a metade do solo seco. Kalma & Badham (1972) verificaram que o albedo do solo nu, quando seco, variou de 20% a 30%; enquanto que, em solos completamente molhado, a variação ficou entre 14% a 16% e em solo moderadamente molhado houve uma redução de 2-4% do solo seco.

De acordo Chia (1967), a variação do albedo do solo quanto ao conteúdo de umidade tem implicações óbvia para práticas agronômicas, especialmente quando a cultura ainda está em fase de crescimento, em que maior parte da superfície do solo está exposta diretamente aos raios solares. Fisicamente, o que ocorreu foi uma absorção maior de radiação pela superfície, devido à presença da água no solo, que culminou, conseqüentemente, numa redução do poder de reflexão da superfície, de forma que mais energia disponível foi usada para evaporação e aquecimento, resultando num albedo menor.

As flutuações no albedo ao longo do desenvolvimento da gramínea apresentou grande variabilidade na combinação de solo exposto com precipitação. Em dias sem chuva, o albedo aumentou e em dias com chuva o albedo diminuiu. Dessa forma, de acordo com Querino et al. (2006), espera-se que em períodos com maior disponibilidade hídrica os valores de albedo sejam menores do que os obtidos na mesma área sob condição de seca. À medida que a gramínea foi desenvolvendo-se, passou a cobrir totalmente o solo, mudando a arquitetura do arranjo foliar, o albedo foi variando menos, se estabilizando em torno do valor final (0,21), quando a fração de cobertura do solo atingiu aproximadamente de 100%.

Segundo Leitão & Oliveira (2000), o solo mais úmido e coberto por vegetação verde e densa absorve mais radiação eletromagnética e, reduz a

refletância, diminuindo os valores do albedo, fato comprovado com o aumento de R_n ou seja, a medida em que mais radiação é absorvida pela superfície, mais radiação estará disponível ao meio. Wang & Davidson (2007) afirmam que as condições hídricas do solo e da planta influenciam diretamente nos padrões sazonais do albedo.

Em função da variação do albedo ao longo do experimento para graus de cobertura variável, foi pertinente setorizar o grau de cobertura em quatro intervalos distintos de percentuais (0-25%; 25-50%; 50-75% e 75-100%) e fazer uma análise de regressão separada para evidenciar possíveis diferenças na estimativa de R_n .

Considerando o intervalo do grau de cobertura de 0-25%, a média do albedo foi de 18%, no intervalo de 25-50% de 17,8%, no intervalo de 50-75% de 17,9% e no intervalo de 75-100% de 21%. Em termos de valor médio diário durante o período do experimento, registrou-se um albedo de 20%.

A partir dessas informações geradas dos intervalos de cobertura do solo, pode-se estimar o saldo de radiação em função da variável independente saldo de radiação de onda curta (Tabela 1).

Tabela 1. Coeficientes angular (a) e linear (b), erro padrão de estimativa (SEE) e coeficiente de determinação (r^2) para a regressão do período diurno ($W m^{-2}$) do saldo de radiação (R_n) sobre o saldo de radiação de ondas curtas (R_{ns}), em cinco intervalos de grau de cobertura da gramínea.

Intervalos	Modelos de regressão	Parâmetros do modelo		Número de Dias
		SEE ($W m^{-2}$)	r^2	
0-25%	$R_n = 0,9001R_{ns} - 36,701$	23,24	0,9763	7 dias
25-50%	$R_n = 0,9038R_{ns} - 12,929$	13,93	0,9881	6 dias
50-75%	$R_n = 0,9241R_{ns} - 17,801$	12,53	0,9939	8 dias
75-100%	$R_n = 0,9095R_{ns} - 25,448$	18,44	0,9867	38 dias
0-100%	$R_n = 0,9072R_{ns} - 22,974$	18,87	0,9876	84 dias

Os resultados encontrados revelam que os modelos gerados nos quatro intervalos de grau de cobertura não expressaram diferenças expressivas entre

as fases, ou seja, o saldo de radiação pode ser obtido em função do saldo de radiação de onda curta independentemente do grau de cobertura do solo. Logo, o modelo geral (0-100% de cobertura) representa satisfatoriamente o saldo de radiação (Figura 12).

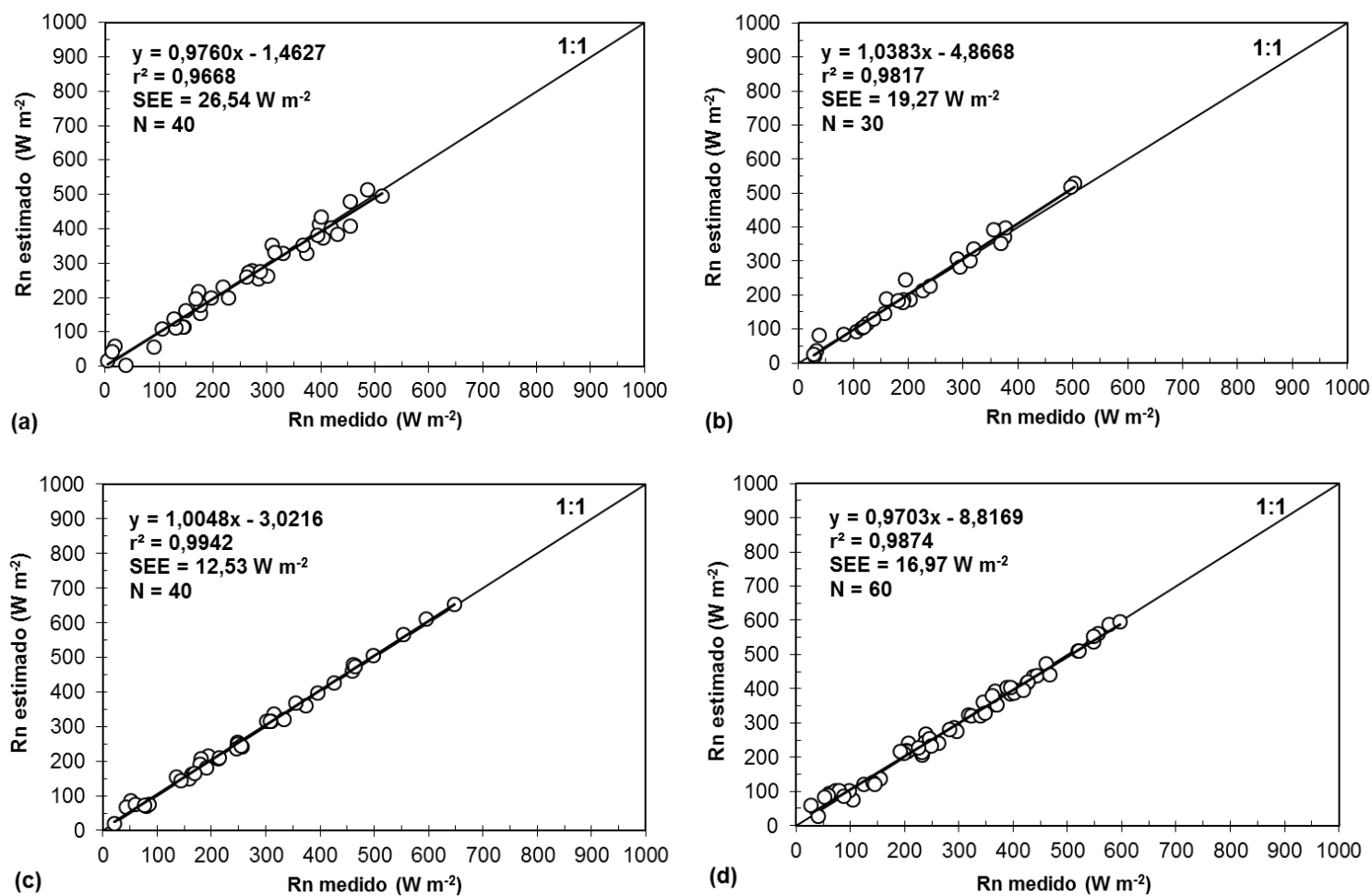


Figura 12. Validação do saldo de radiação (R_n) estimado com base no saldo de radiação de onda curta (R_{ns}) em relação ao saldo de radiação medido (W m^{-2}) em função do grau de cobertura, 0-25% (a), 25-50% (b), 50-75% (c) e 75-100% (d).

CONCLUSÃO

1 - A obtenção do saldo de radiação em função da radiação solar incidente mostrou-se apropriada para as condições de estudo. Porém, apresenta como desvantagem há não contabilização de parâmetro da superfície.

2 - A obtenção do saldo de radiação em função do saldo de radiação de ondas curtas melhorou a estimativa deste parâmetro, pois foi acrescentado o albedo da superfície.

3 - O grau de cobertura do solo ao longo do estudo não interferiu no saldo de radiação de ondas curtas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALADOS, I.; FOYO MORENO, I.; OLMO, F. J.; ALADOS ARBOLEDAS, L. Relationship between net radiation and solar radiation for semi-arid shrub-land. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 116, n. 3, p. 221 - 227, 2003.

ALLEN, R. G. Ref-ET: Reference Evapotranspiration Calculator; Version 3.1.15 for Windows. Idaho: University of Idaho, 2013. 91 p.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. Roma: **FAO Irrigation and Drainage Paper**, n. 56. Rome, 300p. 1998.

ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J. Evaluating methods of estimating global radiation and vapor pressure deficit using a dense network of automatic weather stations in coastal Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 118, p. 237 – 250, 2003.

ALMEIDA, O. A. **Informações meteorológicas do CNP-Mandioca Fruticultura Tropical**. Cruz das Almas, BA: EMBRAPA - CNPMF. 1991. 35 p. EMBRAPA - CNPMF. Documentos, 34.

AZEVEDO, P. V.; TEIXEIRA, A. H. C.; SILVA, B. B.; SOARES, J. M.; SARAIVA, F. A. M. Avaliação da reflectância e do saldo de radiação sobre um cultivo de videira europeia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 1 - 7, 1997.

BAPTISTA, W. A.; OLIVEIRA, L. M. **Atributos climáticos do estado da Bahia**. Salvador: SEI - Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, 1998. 85 p. (Série Estudos e Pesquisas, 38).

BLONQUIST JÚNIOR, J. M.; TANNER, B. D.; BUGBEE, B. Evaluation of measurement accuracy and comparison of two new and three traditional net radiometers. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 10, p. 1709 - 1721, 2009.

CAMPBELL, G. S.; DIAK, G. R. Net and thermal radiation estimation and measurement. In: VINEY, M. K. **Micrometeorology in agricultural systems**. Madison: American Society of Agronomy/Crop Science Society of America/Soil Science of America, 2005. 584 p. (Agronomy monograph, 47).

CHIA, L.-S. Albedo of natural surfaces in Barbados. **Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society**, v. 93, n. 395, p. 116 – 120, 1967.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG. **Ciência Agrotécnica**, v. 27, n. 6, p. 1260-1263, 2003.

ENORÉ, D. P. **Estudos de saldos de radiação a superfície estimados por satélites**. 116f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2012.

FIETZ, C. R.; FISCH, G. F. Avaliação de modelos de estimativa do saldo de radiação e do método de Priestley-Taylor para a região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 449 - 453, 2009.

HELDWEIN, A. B.; MALDANER, I. C.; BOSCO, L. C.; TRENTIN, G.; GRIMM, E. L.; RADONS, S. Z.; LUCAS, D. D. P. Saldo de radiação diurno em dosséis de batata como função da radiação solar global. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43, n. 1, p. 96 - 104, 2012a.

HELDWEIN, A. B.; MALDANER, I. C.; RADONS, S. Z.; LOOSE, L. H.; LUCAS, D. D. P.; HINNAH, F. D. Estimativa do saldo de radiação em girassol como função da radiação solar global. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 194 – 199, 2012b.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Ed. AP. Vancouver Canadá, 1983. 389 p.

JACOBS, A. F. G.; VAN PUL, W. A. J. Seasonal changes in the albedo of a maize crop during two seasons. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 49, n. 4, p. 351 - 360, 1990.

KALMA, J. D.; BADHAM, R. The radiation balance of a tropical pasture, I. The reflection of short – wave radiation. **Agricultural Meteorology**, v. 10, p. 251 – 259, 1972.

KAMINSKY, K. Z.; DUBAYAH, R. Estimation of surface net radiation in the boreal forest and northern prairie from shortwave flux measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. 24, p. 29707–29716, 1997.

KJAERGAARD, J. H.; CUENCA, R. H.; PLAUBORG, F. L. Long-term comparisons of net radiation calculation schemes. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 123, n. 3 p. 417 - 431, 2007.

KUSTAS, W.P.; PINKER, R.T.; SCHMUGGER, T.J.; HUMES, K.S. Net radiation estimated for semiarid rangeland basin sensed date. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 71, n. 3, p. 337–357, 1994.

LEITÃO, M. M. V. B. R.; OLIVEIRA, G. M. Influência da irrigação sobre o albedo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 214 - 218, 2000.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S.; LIRA, C. A. B. O.; BORGES JÚNIOR, J. C. F.; SILVA, B. B. Saldo de radiação em caupi e mamona nos municípios de Areia-PB e Garanhuns-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 1, p. 93 - 102, 2014.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of Environmental Physics**. 2.ed. London: Edward Arnold, 1990. 291 p.

MURTAGH, G. J. Relations between net radiation, global solar radiation, and sunshine on the north coast of new south wales. **Australian Meteorological Magazine**, v. 24, n. 3, p. 111 – 114, 1976.

OCAMPO, D.; RIVAS, R. Estimating daily net radiation from multiple linear regression models. **Revista Chapingo**, v. 9, n. 2, p. 263-272, 2013.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; MARIANO, G. L. Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zênital na região Amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 42 - 49, 2006.

SENTELHAS, P. C.; NASCIMENTO, A. L. C. Variação sazonal da relação entre o saldo de radiação e a irradiância solar global. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 18, n. 1, p. 71 - 77, 2003.

SOUZA, A. P.; ESCOBEDO, J. F. Estimativas da radiação global incidente em superfícies inclinadas com base na razão de insolação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 3, p. 483 - 491, 2013.

SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A.; CARVALHO, D. F. Relações do saldo de radiação em grama batatais e capim tanzânia com a radiação solar global em Piracicaba-SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, n. 3, p. 250 - 256, 2007.

STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v. 51, n. 4, p. 289 - 291, 1993.

PEREIRA, A. B.; SENTELHAS, P. C.; VILLA NOVA, N. A. Estimativa do balanço de energia radiante em função de elementos climáticos Santa Maria - RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 2, p. 201 - 206, 1998.

WANG, S.; DAVIDSON, A. Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, n. 2-4, p. 133-142, 2007.

WANG, S.; TRISHCHENKO, A. P.; SUN, X. M. Simulation of canopy radiation transfer and surface albedo in the EALCO model. **Climate Dynamics**, v. 29, n. 6, p. 615–632, 2007.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DNNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparisons of models . **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 5, p. 8995 – 9005, 1985.

WMO. **Guide to meteorological Instruments and methods of observation**. [S.I.], World Meteorological Organization, 2008.