

Revisão sobre saldo de radiação em plantas de cobertura contínua e descontínua e perspectivas para sistemas mistos (iLPF)



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Pesca e Aquicultura
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 6

Revisão sobre saldo de radiação em plantas de cobertura contínua e descontínua e perspectivas para Sistemas Mistos (iLPF)

Jones Simon

Rodrigo E. Munhoz de Almeida

Embrapa Pesca e Aquicultura

Palmas, TO

2014

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Pesca e Aquicultura

Quadra 104 Sul, Av. LO 1, N. 34, Conj. 4, 1º e 2º pavimentos
CEP: 77020-020, Palmas, Tocantins, Brasil
Fone: (63) 3229.7800/ 3229.7850
www.embrapa.br/pesca-e-aquicultura

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Eric Arthur Bastos Routledge*
Secretário-Executivo: *Renata Melon Barroso*

Membros: *Alisson Moura Santos, Andrea Elena Pizarro Munoz, Milena Santos de Pinho, Giovanni Vitti Moro Hellen Kato, Jefferson Cristiano Christofoletti, Marcelo Könsgen Cunha e Marta Eichemberger Ummus.*

Diagramação: *Juliano Daudt Fontoura*

1ª edição

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Pesca e Aquicultura

Simon, Jones

Revisão sobre saldo de radiação em plantas de cobertura contínua e descontínua e perspectivas para Sistemas Mistos (iLPF)/ Jones Simon – Palmas : Embrapa Pesca e Aquicultura, 2014.

40 p. : il. color. (Documentos / Embrapa Pesca e Aquicultura, ISSN 2318-1400; 6).

1.iLPF. 2.Sistemas Agrícolas. 3.Radiação Solar . I. Simon, Jones. II. Almeida, Rodrigo E. Munhoz. III. Séries.

CDD 664.94

© Embrapa 2014

Autores

Jones Simon

Pesquisador em agrometeorologia,
Embrapa Pesca e Aquicultura, Palmas, TO,
jones.simon@embrapa.br

Rodrigo E. Munhoz de Almeida

Pesquisador em Fitotecnia, Embrapa Pesca e
Aquicultura, Palmas, TO.

Apresentação

O balanço de radiação ou saldo de radiação sobre a superfície é a contabilização líquida de toda a energia radiante presente no sistema solo-atmosfera, resultando na radiação líquida, a qual será a energia disponível para os processos que ocorrem junto à superfície. Nos estudos de relações hídricas de culturas, envolvendo perda de água, o saldo de radiação é fundamental, pois é o principal fator energético do processo evapotranspiratório.

Apesar da grande contribuição dessa variável para agricultura, seja no fomento de cálculos de evapotranspiração de culturas, seja na sua repartição em calor sensível (usado para aquecimento dentro do sistema solo-planta-atmosfera ou evaporação de água) ou em calor latente (usado para a transpiração das plantas e fotossíntese), ainda faltam estudos que envolvam sistemas que interagem de forma complexa, onde a cobertura do solo não seja contínua e homogênea.

Esta publicação aborda alguns aspectos sobre a importância desta variável, bem como formas de medida e formas de estimativa, exemplificando as técnicas e alguns modelos que foram elaborados para as mais diversas conformações de cultivos entre plantas de caráter anual ou perene. São feitas algumas considerações sobre como estudos dessa natureza poderiam beneficiar ainda mais sistemas mistos de plantio, no qual se inclui a ILPF.

Carlos Magno Campos da Rocha
Chefe Geral da Embrapa Pesca e Aquicultura

Sumário

Introdução.....	9
Importância da interceptação de radiação solar pelas plantas.....	13
Medida do saldo de radiação em comunidades vegetais..	15
Estimativa do saldo de radiação solar em arbóreas.....	19
Relação entre o saldo de radiação de plantas e medidas de radiação obtidas em estações e postos agrometeorológicos	19
Estimativa através do uso da Lei de Beer.....	21
Estimativa do saldo de radiação por modelagem físico-matemática	25
Considerações Finais	31
Referências Bibliográficas	32

Revisão sobre saldo de radiação em plantas de cobertura contínua e descontínua e perspectivas para Sistemas Mistos (iLPF)

Jones Simon

Rodrigo E. Munhoz de Almeida

Introdução

A energia radiante absorvida por uma planta é um dos principais determinantes de sua taxa fotossintética e da perda de água através da transpiração (GREEN et al., 2003; SIMON, 2010) e, juntamente a fatores complementares como temperatura do ar e do solo, disponibilidade hídrica e nutrição mineral, condiciona o crescimento e o desenvolvimento vegetal, suas produções e a qualidade destes produtos.

Nos estudos de relações hídricas de culturas, envolvendo perda de água, o saldo de radiação é fundamental, pois é o principal fator energético do processo evapotranspiratório. Poucos estudos são realizados sobre a dinâmica do saldo de radiação em culturas agrícolas, e a grande maioria, concentrado em culturas com distribuição “contínua” da cobertura sobre o solo, e ainda alguns em cultivos perenes descontínuos, sendo praticamente nulos os estudos em sistemas produtivos mistos como a integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF). Se considerarmos consórcios de plantas como sistemas mistos, encontramos trabalhos sobre o comportamento da radiação em milho com braquiária, milho com feijão (MUNZ et. al, 2014), por exemplo.

O sistema de ILPF consiste em integrar na mesma área um componente florestal, o cultivo de lavouras e pastagens para criação de animais. Neste sistema o espaçamento das entrelinhas das árvores aumenta em relação ao cultivo de florestas plantadas, para o aproveitamento das entrelinhas na produção de grãos e/ou criação de animais. Para o sucesso destas atividades e ainda aumentar a intensificação da área, é de fundamental importância estudar e conhecer o balanço de radiação nas linhas e entrelinhas das árvores, potencializando a produção de grãos e forragem nas entrelinhas.

Com o advento da irrigação localizada, utilizada principalmente para coberturas vegetais “descontínuas”, como pomares, cafezais, seringais, etc., há um crescente interesse em se determinar a interceptação da radiação e o saldo de energia radiante tanto da cobertura vegetal como um todo, mas também de partes constituintes, como a vegetação das linhas e entrelinhas de plantio. A energia radiante absorvida pela folhagem constituinte dessas coberturas é uma variável de interesse em estudos de balanço de carbono (fotossíntese) e de transpiração de plantas de interesse econômico como pomares, seringais e cafezais, por exemplo, nos quais são encontradas densidades de plantios que levam à distribuição de plantas “isoladas” (com espaçamento largo e pouca interferência entre elas quanto ao balanço de energia radiante) ou em renques com adensamento do número de plantas na linha de plantio (folhagem contínua na linha de plantio, pelo fato das copas se tocarem). Além disso, é de extrema importância que se façam estudos na área de distribuição e aproveitamento de radiação solar para sistemas como o ILPF, pois pode ditar a melhor conformação de plantio e identificar por quanto tempo (em anos ou safras) a agricultura pode se manter sustentável dentro das entrelinhas do sistema.

Para aumentar o potencial produtivo de lavouras e/ou pastagens nas entrelinhas das árvores no sistema de ILPF, é importante considerar uma maior incidência de radiação solar neste local. Para isso o planejamento das áreas com ILPF é fundamental, sendo que o plantio de mudas no sentido leste-oeste favorece a incidência de luz nas

entrelinhas e, com isso, a obtenção do maior potencial produtivo das plantas cultivadas neste local. O espaçamento é outro fator importante nas áreas de ILPF, ou seja, quanto maior o interesse nas lavouras ou pastagens, maior o espaçamento entre renques com uso de linhas únicas ou duplas de árvores. Inversamente, quanto maior o interesse na produção florestal, menor o espaçamento entre renques e o uso de linhas triplas ou quádruplas. Não existem estudos que avaliaram o saldo da radiação em dossel descontínuo nestas formas de adoção da ILPF, a fim de se encontrar o melhor arranjo entre as plantas.

A determinação do saldo de radiação das copas das árvores, sejam isoladas ou em renques, é mais complexa do que a determinação para cobertura vegetal contínua, pois a própria geometria de plantio e da copa, o porte da cultura e sua área foliar são fatores que afetam as trocas radiativas e determinam dificuldades nas medidas, exigindo procedimentos e técnicas diferenciadas, como aparatos móveis e instrumentações adequadas. A dificuldade nessas medidas tem conduzido à tentativa de desenvolvimento de modelos de estimativa de interceptação de radiação solar por dosséis vegetativos e mesmo da absorção de energia radiante de ondas curtas e de ondas longas, com a finalidade de viabilizar o uso prático dessa variável, tanto em pesquisa como em sistemas produtivos. Mas, a própria validação de modelos físico-matemáticos, e daqueles baseados em regressões lineares simples, que levam em considerações outras variáveis determinantes do saldo de radiação, como área foliar, porosidade do dossel, irradiância solar global, etc., exige medidas diretas da interceptação da radiação solar ou mesmo da absorção de energia radiante em todos os comprimentos de onda pelas plantas.

A literatura mostra algumas tentativas de desenvolvimento de técnicas de medidas e de desenvolvimento de modelos de estimativa da interceptação de radiação nos diferentes tipos de dosséis. Quanto às técnicas, há exemplos de uso de sensores fixos em torno de

renques (LANDSBERG et al., 1975; THORPE, 1978), ou posicionados acima e abaixo do dossel (ANNANDALE et al., 2004; OYARZUN et al., 2007). Uma técnica proposta por McNaughton et al. (1992) em Palmerston, Nova Zelândia, faz uso de sensores móveis (tanto saldo radiômetros, quanto quantômetros) girando em torno da copa de uma árvore “isolada” para integrar espaço-temporalmente a absorção de radiação pela copa da árvore. Uma modificação dessa técnica foi utilizada em Piracicaba-SP, para movimentar saldo-radiômetros ao longo da linha de renques de cafeeiros (MARIN, 2003; ANGELOCCI et al., 2008) integrando a radiação absorvida por plantas alinhadas no renque, tendo-se verificado sua potencialidade.

Por outro lado, vários modelos físico-matemáticos e de regressão entre o saldo de radiação de copas de lenhosas, tanto com árvores isoladas ou em plantio adensado em linhas (renques) e variáveis radiométricas, têm sido desenvolvidos (PALMER, 1989; WANG & JARVIS, 1990; McNAUGHTON et al., 1992, GREEN et al., 2003; ANNANDALE et al., 2004; ANGELOCCI et al., 2004; PILAU, 2005; PEREIRA, GREEN E VILLA NOVA, 2006), havendo tentativas de sua validação a partir de medidas com sensores fixos ou móveis.

Para sistemas mistos de alta complexidade, como o iLPP, ainda não existem recomendações de técnicas para obtenção dessa variável energética. Há duas possibilidades que podem ser viabilizadas, sendo uma delas o estudo individualizado da componente arbórea e da entrelinha de cultivo, seja ela agrícola ou pastagem, ou ainda viabilizar métodos de amostragem que possam contabilizar o saldo de radiação do sistema como um todo, o qual irá variar bastante pela interação que ocorre dentro de cada parcela do sistema, composta pela entrelinha e pelos dois renques de arbóreas que delimitarão cada parcela.

Considerando que há poucos trabalhos publicados tanto quanto às técnicas de medida como quanto ao desenvolvimento de modelos de estimativa de absorção de energia radiante por renques de coberturas vegetais descontínuas ou em sistemas mistos de alta complexidade, esta revisão de literatura poderá nortear algumas tomadas de decisão.

Importância da interceptação de radiação solar pelas plantas

Dentre os vários fatores ambientais que determinam o crescimento e desenvolvimento de plantas, a radiação solar interceptada pela folhagem é a principal fonte de energia para os processos de fotossíntese, produção de biomassa, balanço de energia, troca de dióxido de carbono e transpiração (MARISCAL et al., 2000; CONSOLI et al., 2006). Dentro de um conjunto de plantas heterogêneas, a distribuição, absorção e atenuação da radiação são geralmente determinadas por uma variação nas condições de incidência da radiação, bem como pela arquitetura e propriedades ópticas da folhagem.

A maneira como a radiação fotossinteticamente ativa é interceptada pelo dossel das plantas é fundamental para a fotossíntese e para a produção das culturas (STEWART et al., 2003). Segundo esses autores, fatores como forma, densidade populacional e espaçamento entre linhas, afetam a distribuição da área foliar no dossel das plantas, conseqüentemente interferindo no regime radiativo.

Estudos têm sido realizados para modelagem dos processos hídricos e fisiológicos, principalmente de transpiração em plantas, os quais são de grande importância para estimativas precisas de consumo de água e de produção das culturas, baseados em dados de radiação interceptada ou absorvida como parâmetro principal. Nutman (1941) já demonstrou a relação existente entre a taxa transpiratória de cafeeiros e a irradiância solar global, fato destacado também em estudos realizados por Gutiérrez e Meinzer (1994) e Marin et al. (2003). Este último estudo mostra ainda uma acentuada relação entre o fluxo de seiva de uma planta e o saldo de radiação do renque de cafeeiros. Resultados semelhantes foram encontrados para macieira, nogueira, videiras e outras espécies lenhosas (THORPE, 1978; GREEN, 1993; VALANCOGNE et al., 2000). O precursor desse tipo de estudos foi Monteith (1965), que ao desenvolver o modelo de Penman-Monteith

para estimativa de evapotranspiração, o qual é considerado como padrão até os dias de hoje, também desencadeou outros estudos para estimativa de transpiração em plantas isoladas (BUTLER, 1976; McNAUGHTON et al., 1992; GREEN, 1993).

Desta forma, com o saldo de radiação da folhagem da planta de interesse, e as demais variáveis exigidas (déficit de pressão de vapor, quantidade de água na planta e no solo, IAF, etc) pelos modelos de estimativa da transpiração, tem-se a possibilidade de estabelecer relações entre a transpiração da planta e a evapotranspiração de referência, determinando o coeficiente basal de culturas que orientarão no processo de irrigação localizada, otimizando a sua utilização, principalmente na agricultura, manejando de forma mais racional os sistemas de irrigação.

Além disso, estudos que envolvem sistemas mais complexos, como a iLPP, podem ter sua produtividade aumentada, manejando-se da melhor maneira a distribuição dos componentes agrícola e arbóreo, principalmente favorecendo a interação energética mais eficiente entre os mesmos.

O desempenho das plantas cultivadas nas entrelinhas das árvores no sistema iLPP é totalmente dependente da quantidade de radiação disponível a estas plantas, e a influência dessas árvores é maior nas linhas da cultura próximas aos renques arbóreos, formando um gradiente de menor influência até o centro da entrelinha. Munz et al., 2014a estudaram milho consorciado com feijão em sistemas de cultivo em faixas e identificaram que o sombreamento reduz em 47,6% a PAR que chega nas linhas de feijão mais próximas ao milho (0,5m), 31,9% para as segundas linhas (1m de distância) e 22% para as terceiras linhas (1,5m de distância) e apenas 13% para as linhas centrais da faixa que contêm feijão (2m distância da linha de milho), isso acarreta uma perda de produtividade para as plantas sombreadas (feijão). Para estes autores, a maior produtividade de feijão foi obtida nas linhas mais centrais da faixa de plantio, ou seja, as linhas mais distantes das faixas onde houve o plantio do milho, linhas centrais,

onde a incidência de radiação foi maior. Desta forma, o planejamento das áreas de ILPF em relação ao espaçamento, orientação de plantio, espécies arbóreas e qual o período de tempo ideal de cultivo em função da altura e tamanho de copa das árvores, são fundamentais para se estabelecer o sistema de ILPF com maior potencial de retorno.

Medida do saldo de radiação em comunidades vegetais

A energia radiante interceptada pelas plantas é o fator básico do ambiente envolvido em seus processos físicos e fisiológicos. Devido a sua importância, gera vários estudos teóricos e experimentais sobre a forma de interceptação e aproveitamento da radiação solar, como um dos fatores principais da fotossíntese e transpiração de plantas e como fator desencadeante de estádios fenológicos, qualidade de frutos, etc. Além disso, o R_n é utilizado nos processos de aquecimento do ar e do solo, nos cálculos de demanda hídrica que, hoje em dia, são essenciais à utilização racional dos recursos hídricos.

Estudos sobre interceptação de radiação tem sido realizados, principalmente em dosséis horizontalmente homogêneos, quanto à distribuição de plantas no terreno e com folhagem randomicamente distribuída, como pastagens (BROUGHAM, 1958), girassol (LEMEUR, 1973), soja (FONTANA et al., 1991), fava (RIDAO et al., 1996), milho (KUNZ et al., 2007), amendoim (ASSUNÇÃO et al., 2008) e sistema consorciado de grãos (MUNZ et al., 2014a; MUNZ et al., 2014b), entre outras culturas, principalmente pela maior facilidade experimental na sua determinação, já que essas culturas, mesmo cultivadas em linhas, quando atingem seu máximo desenvolvimento de área foliar cobrem totalmente o terreno. Nesse tipo de cobertura, a determinação das trocas verticais de energia radiante entre a superfície vegetada e a atmosfera é suficiente para caracterizar o saldo de radiação (correspondente à energia radiante absorvida) da cobertura vegetal. Para isso, as medidas são feitas com os sensores colocados na horizontal num nível acima da cobertura.

Em pomares, cafezais, seringais e lenhosas em geral, que possuem espaçamentos largos, mesmo no estágio adulto, somente uma parte do terreno é coberto pela vegetação. Em plantios adensados, nos quais as copas das árvores chegam a se tocar na linha de plantio (“renques”) ou podem, em certos casos, serem consideradas plantas “isoladas”, muitas vezes há interesse em se determinar o saldo de radiação dessas estruturas vegetais específicas (linhas de plantio, árvores isoladas). Para tal, é necessário considerar que além das trocas de energia radiante na vertical (sentido atmosfera-solo), há trocas laterais de energia entre as árvores e a atmosfera, além da interação de energia entre árvores e das árvores com a entrelinha.

Nos sistemas mistos, ainda existem dúvidas a serem respondidas, pois estudos que envolvem as partes componentes do sistema de forma isolada são, em teoria, mais fáceis, mas podem falhar ao explicar os tipos de interação que ocorre no sistema. Faltam trabalhos na literatura que abrangem todo o sistema, pois há dificuldade em se elaborar métodos e técnicas que prevejam trabalhar o sistema por completo, englobando plantios contínuos e descontínuos na mesma área. Nas determinações da energia radiante absorvida pela copa das árvores isoladas ou em renques, pode-se dispor de sensores radiométricos posicionados acima e abaixo do dossel vegetativo. Porém, ainda existem poucos trabalhos realizados sobre interceptação de radiação por dosséis descontínuos, com setorização da vegetação, onde se trabalham com plantas isoladas ou trechos de renques. Stanhill, Hofstede e Kalma (1965) realizaram um dos primeiros estudos do balanço de radiação em um dossel agrícola, utilizando um pomar de laranjeira, porém utilizando uma metodologia similar à utilizada para cultivos homogêneos, posicionando um saldo-radiômetro com suas placas na horizontal acima do pomar.

No caso de plantas “isoladas”, que crescem individualmente, e não sofrem influência da interceptação de radiação pelas plantas vizinhas, Charles-Edwards e Thornley (1973) e Warren Wilson (1981) fizeram uma abordagem teórica sobre a forma de interceptação da radiação por

este tipo de dossel. No caso da formação de renques, trabalhos como os de Proctor et al. (1972), Charles-Edwards e Thorpe (1976), Palmer e Jackson (1977), Palmer (1977) e Palmer (1989), abordam este assunto, tratando sempre da interceptação de radiação pela cultura da macieira.

Um trabalho pioneiro nos estudos de saldo de radiação em renques foi o de Landsberg et al. (1975), que realizaram medidas de saldo de radiação da folhagem de um renque de macieiras na Grã-Bretanha. Neste estudo foram instalados oito saldo-radiômetros lineares em torno de uma árvore de macieira, fixados de maneira a ter as placas sensoras orientada ao longo da linha de plantio, compondo um cilindro imaginário em torno da copa, permitindo verificar o padrão diário de variação da radiação por unidade de área foliar. Posteriormente, Thorpe (1978), utilizou-se da mesma técnica para obter o saldo de radiação da copa por unidade de área foliar (R_{nf}), em macieiras, na Grã-Bretanha, para uso na estimativa da transpiração destas plantas.

A partir da década de 90, essa técnica de determinação de interceptação por dosséis descontínuos sofreu mudanças, de modo a melhorar a amostragem, integrando-se a medida de saldo de radiação no espaço e no tempo. Desta maneira, os equipamentos passaram a ser movimentados ao redor das copas das plantas de interesse, para se minimizar o efeito de heterogeneidade da copa na amostragem proporcionada pela distribuição heterogênea da folhagem. Desta forma, surgiram duas abordagens diferenciadas, mas baseadas no mesmo princípio de integração espaço temporal. Em uma delas, desenvolvida para plantas isoladas, o equipamento de medidas proporciona uma geometria esférica (“esfera nocional”) de medida para integração dos fluxos de entrada e saída a partir de sua superfície. Na outra, a técnica forma um cilindro nocional de medidas para a integração, pois o mesmo percorre um trecho de renques.

O primeiro trabalho com a técnica da esfera nocional foi publicado por McNaughton et al. (1992), que usaram em Palmestorn, Nova Zelândia, um sistema móvel de medidas denominado por eles de “Whirligig”

("pião"), o qual permitia aos sensores de radiação distribuídos latitudinalmente em torno da copa fazer um movimento rotacional no sentido horizontal em torno da copa das árvores. O equipamento foi montado em torno de uma planta de *Robinia pseudoacacia*, com 3,8 m de altura e 10,6 m² de área foliar, e os resultados de saldo de radiação se mostraram consistentes.

A técnica de medida de interceptação de radiação em renques, formando geometria cilíndrica, foi melhorada e empregada em cafezais e, diferentemente dos trabalhos anteriores de Landsberg et al. (1975) e Thorpe (1978) onde a disposição dos radiômetros era fixa, nesses trabalhos utilizou-se um sistema composto por um arco de medida onde os equipamentos eram fixos, mas movidos por um sistema de correias e engrenagens, tracionadas por motor elétrico, percorrendo o caminho de varredura sobre um trilho de base fixa.

O sistema anteriormente descrito foi modificado em Piracicaba-SP, pelo uso de sensores que movimentavam-se no sentido horizontal, ao longo de um trecho de renque de cafeeiros, nos sentidos de ida e volta. Os dados de saldo de radiação obtidos foram utilizados para se determinar a relação com a irradiância solar global, e o saldo de radiação de gramado, além de ser usado em modelos de evapotranspiração de plantas.

Simon et al. (2009), utilizando da metodologia iniciada por Marin (2003), mas com um sistema adaptado para culturas de grande porte, trabalharam com um renque de limeiras ácidas, no qual promoveram a modificação no número de sensores, utilizando-se 12 sensores para a formação do cilindro de amostragem e encontraram valores de saldo de radiação, convertidos em calor latente, coerentes com valores de evapotranspiração medidos por lisimetria de pesagem.

Em sistemas consorciados, como exemplo, podemos citar Munz et al. (2014a) que avaliaram a radiação PAR com sensores específicos (quantômetros), em milho consorciado com feijão, num sistema de cultivo em faixas (aqui poderíamos supor um sistema de ILPF, devido a

existir linhas de altura mais elevadas que sua entrelinha), e verificaram que as maiores produtividades de feijão ocorreram nas linhas centrais da faixa de cultivo do feijoeiro, onde a PAR era maior, devido a disposição das linhas de milho nas faixas laterais formarem uma barreira que vai perdendo influência nas linhas de feijão distribuídas na faixa até o centro da mesma, ou seja, conforme as linhas de feijão se afastam das de milho, a sua captação de energia aumenta e conseqüentemente sua produtividade, mas mesmo as que estão bem centrais ainda apresentam redução na captação de energia, devido ao movimento diário do sol, onde início da manhã e final da tarde o ângulo de incidência se torna pequeno.

Estimativa do saldo de radiação solar em dosséis descontínuos

Estudos têm sido desenvolvidos sobre a estimativa da radiação interceptada neste tipo de dosséis. Basicamente existem três tipos de metodologias quando se trabalha com dosséis descontínuos, seja de plantas “isoladas” ou de trechos de renque: a) através da relação entre o saldo de radiação da copa com a irradiância solar global e com o saldo de radiação de gramado; b) utilizando-se a lei de Beer modificada por Monsi e Saeki (1953); c) por modelagem físico-matemática. Abaixo será detalhada cada uma dessas metodologias

Relação entre o saldo de radiação de plantas e medidas de radiação obtidas em estações e postos agrometeorológicos

O estudo baseado em relações radiométricas é considerado o mais simples entre as três metodologias citadas, pois o mesmo é baseado em comparações entre as medidas de saldo de radiação (R_n) obtidas em campo (nas mais diversas espécies lenhosas) e as medidas de

radiação solar obtidas em um posto agrometeorológico/ meteorológico. Essas variáveis são facilmente obtidas através dos equipamentos de rotina presentes nessas estações e evitam a necessidade de se utilizar equipamentos de alta complexidade e alto custo para a determinação direta do R_n . A única ressalva é que essas relações são bem específicas para cada região, não podendo ser extrapoladas para locais onde os estudos não foram conduzidos.

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

Aqui podemos citar alguns trabalhos que tentaram estabelecer esses tipos de relações para localidades e estações do ano específicas. Utilizando-se de dados obtidos com um sistema móvel de integração do saldo de radiação (R_n), Angelocci e Villa Nova (1999) em uma árvore de limeira ácida "Tahiti", com $41,6 \text{ m}^2$ de área foliar, relatam que o R_n da árvore equivaleu em média ao R_n de $14,1 \text{ m}^2$ de gramado. Entretanto, essa relação não foi constante ao longo do ano, pois no período de dezembro a março correspondeu a $13,5 \text{ m}^2$ de gramado e de maio a julho a $17,1 \text{ m}^2$ de gramado.

Trabalho similar realizado por Pilau et al. (2007) em Piracicaba, com laranjeira, com área foliar de 37 m^2 , e variação de área foliar obtida a partir de desfolhamentos ($27,3 \text{ m}^2$, $18,2 \text{ m}^2$, $12,0 \text{ m}^2$, $0,0 \text{ m}^2$) mostrou relações variáveis entre R_n da copa, com o R_n de gramado e a irradiância solar global, de acordo com a variação da área foliar.

Com os dados de R_n de uma nogueira com $26,4 \text{ m}^2$ de área foliar, obtidos por Green (1993) e de uma limeira ácida, com $39,9 \text{ m}^2$ de área foliar, Pereira et al. (2001) estabeleceram relações entre o saldo de radiação dessas árvores (R_{nf}) e o saldo de radiação de gramado (R_{ng}).

Os saldos de radiação integrados para as árvores corresponderam ao saldo de radiação de 12,58 m² (nogueira) e 8,39 m² (limeira ácida) de gramado. Quando os autores expressaram o Rn por unidade de área foliar, obteve-se a relação única, $R_{nf} = 0,32R_{ng}$. Isso mostra que independente do tamanho das copas e de seu IAF, quando os resultados foram convertidos por unidade de área foliar teve-se a mesma relação de Rng com Rnf, tanto limeiras ácidas quanto nogueiras.

Marin (2003) determinou o saldo de radiação para um trecho de renque de cafezal adulto, com espaçamento de 2,5m x 1,0m, e verificou que correspondia a 49% da irradiância solar global. Quando relacionado ao saldo de radiação de gramado, a relação encontrada foi próxima de 1:1.

Ainda não há estudos deste tipo de relação entre o saldo de radiação da copa com a irradiância solar global e com o saldo de radiação de gramado para sistemas de ILPF.

Estimativa através do uso da Lei de Beer

Estudos sobre atenuação luminosa iniciaram-se em 1729 com Pierre Bouguer, na área da química, entretanto o modelo matemático somente foi desenvolvido por Johann Heindrich Lambert em 1760. Os pesquisadores estudaram a variação na absorção de um feixe de luz, em função da alteração na espessura da camada absorvente. Mais tarde, em 1852, August Beer fez um experimento análogo, mas relacionado com a concentração do meio (c), mantendo a espessura da camada constante (b). Combinando estas duas leis resultou a chamada Lei de Beer-Lambert. Na área da física encontramos a seguinte definição: A lei de Lambert–Beer (também designada por lei de Lambert–Beer–Bouguer) estabelece uma relação entre a absorvância (também chamada absorbância ou absorvência) de uma solução e a sua concentração, quando atravessada por uma radiação luminosa monocromática colimada (raios luminosos paralelos).

Na área de produção vegetal, Monsi e Saeki (1953) introduziram a aplicação da Lei de Beer para descrever a extinção luminosa em planta, assumindo que a radiação é extinta exponencialmente no interior do dossel, em função da área foliar e do coeficiente de extinção de radiação solar. A partir deste trabalho, muitos pesquisadores têm aplicado as variações deste modelo para estudar o comportamento da radiação solar em comunidades vegetais, conforme as alterações na estrutura da parte aérea das plantas (IAF, orientação e angulação da folha), no espaçamento e população de plantas (BARTELINK, 1998; DÍAZ-AMBRONA, 1998; LAPPI E STENBERG, 1998), buscando identificar os melhores arranjos espaciais e selecionar cultivares/genótipos de alta produção dentro da linha de desenvolvimento do melhoramento genético.

Além do grande uso em coberturas homogêneas, buscando-se aumento na produtividade, pela melhoria na conformação de plantas e sua distribuição nas linhas de plantio, vários autores tem usado a lei de Beer para estimativa do saldo de radiação de plantas isoladas ou renques de plantas.

Charles-Edwards e Thornley (1973) desenvolveram um modelo simples para interceptação de radiação para uma planta isolada, que tem como suposições: as folhas presentes na copa da planta estão aleatoriamente e uniformemente distribuídas em um volume elíptico, a radiação que atravessa o meio é atenuada de acordo com a lei de Beer e o espalhamento de energia pode ser negligenciado. Os resultados obtidos mostraram que o modelo pode ser usado com boa precisão, se aproximando dos testes realizados em laboratório. Os autores identificaram a necessidade de mais estudos sobre a forma como a energia espalhada interage na planta, e sobre como a distribuição da folhagem e o ângulo foliar podem interferir nessa interação.

Esses modelos, inicialmente desenvolvidos para plantas isoladas, passaram a ser utilizados nas culturas em renques. Charles-Edwards e Thorpe (1976) adaptaram o modelo de Charles-Edwards e Thornley

(1973) para um pomar de macieiras em renque visando o estudo da atenuação da radiação na forma difusa e direta, através da copa das plantas. Para isso consideraram que a densidade do fluxo de radiação que passa através de uma superfície horizontal, em qualquer ponto dentro da cobertura pode ser calculada diretamente. Os autores verificaram que a geometria simulada do renque foi muito semelhante a real, e que os resultados de atenuação de radiação tiveram boa concordância com os valores observados, dando credibilidade ao modelo para estimativa do total de radiação absorvida por um pomar.

Posteriormente, seguindo a evolução dos estudos nessa filosofia de renques, Jackson e Palmer (1979) desenvolveram um modelo simples de interceptação de radiação em dosséis descontínuos. O modelo considera a geometria do pomar (espaçamento, distribuição e forma das plantas) e a radiação sendo extinta exponencialmente, de acordo com a lei de Beer. O modelo foi avaliado frente a medidas obtidas em vários renques de macieiras, no qual se variou o espaçamento entre as linhas de plantio, embora o coeficiente de extinção usado tenha sido fixado em 0,6. O modelo mostrou boa aplicabilidade, além de facilidade na sua aplicação, exigindo poucas variáveis obtidas experimentalmente.

Da mesma forma, Norman e Welles (1983) descrevem um modelo também utilizado em dosséis com cobertura parcial do solo, assumindo uma geometria elipsóide de renque, por ser uma forma geométrica que pode ser extrapolada para as demais silhuetas. O modelo estudou separadamente o componente direto e difuso e o multi-espalhamento nos comprimentos de onda na região do visível e infravermelho, além de acrescentar uma componente correspondente ao balanço de ondas longas. Com estas modificações se possibilitou caracterizar cada componente, considerando suas especificidades, melhorando o ajuste e a precisão do modelo.

Estudos realizados por Marin (2003) em renque de cafeeiros compararam dados de energia radiante absorvida, obtidos experimentalmente por um sistema móvel de medidas e dados

obtidos segundo a Lei de Beer. O coeficiente de extinção para uso da lei de Beer foi determinado por medidas com saldos-radiômetro instalados acima e abaixo da copa, nos quais se obteve valores que variaram de 0,2 a 0,95, com valor médio diário fixo de 0,49. Dados obtidos por meio da aplicação da lei de Beer superestimaram em 9% na média, os dados medidos diretamente no renque. Segundo o autor, a aplicabilidade é viável nos casos em que se determina experimentalmente o coeficiente de extinção luminosa e o índice de área foliar do renque estudado, pois a obtenção de medidas de energia radiante abaixo e acima do dossel é mais simples que o uso de equipamentos para medida direta da radiação absorvida.

Annandale et al. (2004) desenvolveram um modelo bidimensional de interceptação de radiação por renques de árvores frutíferas. O mesmo foi baseado nos modelos propostos por Charles-Edwards e Thornley (1973) e Charles-Edwards e Thorpe (1976) e assume que as folhas são uniformemente distribuídas dentro de um elipsóide e a radiação que penetra no dossel é atenuada conforme a lei de Beer. Além disso, o modelo considera além do renque estudado, os dois renques vizinhos e faz um desmembramento da irradiância solar global, em difusa e direta, nos comprimentos de onda de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e do infravermelho próximo (NIR). Os autores utilizaram o método proposto por Weiss e Norman (1985) para estimar a componente direta e difusa, para as bandas de PAR e do NIR a partir da irradiância solar global. A validação do modelo foi realizada em vários pomares, na qual se teve uma variação distinta entre orientações de renque, densidade de plantas, altura e geometria de plantas e área foliar, e ainda plantas caducifólias e “sempre verdes”. Os dados de radiação transmitida nos pomares foram obtidos pela diferença entre os valores observados no topo da cultura, através de piranômetros da marca LI 200X instalados nas estações meteorológicas automáticas em áreas com horizonte aberto, próximas ao experimento e valores médios de sete tubosolarímetros Delta-T instalados eqüidistantes abaixo da cobertura, posicionados desde a linha de plantio até a metade das entrelinhas subjacentes. Os resultados mostraram que nas condições em que se tem um renque uniforme e elíptico, com uma distribuição uniforme da folhagem, o modelo prevê excepcionalmente bem o ciclo diário da

radiação transmitida, mas em condições onde o dossel não apresenta simetria ou há desuniformidade na distribuição da folhagem, ocorrem erros elevados, chegando a 40% com relação aos valores diários observados. Neste trabalho, os autores reuniram as metodologias empregadas nos estudos citados anteriormente e obtiveram dados consistentes, possibilitando a identificação de fontes de erro até então desconsideradas.

Até o momento na literatura, não existem trabalhos desenvolvidos em sistemas de iLPF. Uma das razões é que o sistema é atual, e faltam metodologias para este tipo de estudo das componentes radioativas num sistema onde suas entrelinhas (faixa do terreno onde será cultivada as culturas agrícolas e posteriormente pastagem) são muito amplas.

Estimativa do saldo de radiação por modelagem físico-matemática

Modelos podem ser usados para investigar uma série de assuntos relacionados à produção vegetal, seja para facilitar o entendimento quanto ao comportamento da cultura dentro de seu contexto ambiental, explorar seu potencial produtivo sob certas condições, verificar hipóteses, melhorar o conhecimento de processos, estimular a integração interdisciplinar, prever o comportamento de um sistema ou ser utilizado como ferramenta de gerência e tomada decisória. Como vantagens, lhes são atribuídos o custo menos oneroso do que experimentos convencionais, a velocidade na obtenção de resultados, o uso em diferentes escalas e a criação de cenários alternativos. Suas limitações abrangem a dificuldade na validação de modelos já existentes, alto custo de obtenção de alguns dados, como por exemplo, séries meteorológicas, variabilidade espacial e seleção de dados de entrada. Muitas são as formas de avaliar o desempenho de um modelo e, por vezes, deduções errôneas são tiradas, descaracterizando a utilização desta ferramenta (CORREA et al., 2011).

Tanto as medidas pontuais de interceptação de radiação, como as realizadas pelos sistemas móveis de integração do saldo de radiação, são utilizadas para a aferição de modelos físico-matemáticos, criados para estimar a interceptação da radiação por espécies arbóreas.

A modelagem físico-matemática geralmente envolve correlações mais complexas, as quais levam em consideração um maior número de variáveis atuando sobre o sistema, como: dimensões do talhão, forma e dimensões do renque e/ou das plantas, sua orientação, radiação solar (componentes direta e difusa), densidade foliar ou porosidade do dossel e também seu poder de reflexão, entre outras, como verificado em modelos de interceptação de radiação desenvolvidos para videira por Riou, Valancogne e Pieri (1989), e para macieiras por Palmer (1989) e Green et al. (2003).

Uma das primeiras tentativas de se modelar matematicamente a interceptação de radiação, por plantas isoladas ou renques, foi realizada por Charles-Edwards e Thorpe (1976) que testaram a aplicabilidade de um modelo empírico desenvolvido por Charles-Edwards e Thornley (1973) na interceptação de radiação por renques de macieiras, simulando perfis de transmissão de radiação. Os dados simulados foram próximos aos medidos experimentalmente, e as variações sazonais que ocorreram na interceptação da radiação foram similares àquelas encontradas por Allen (1974) em renques de conformação retangular. Os mesmos autores verificaram que renques orientados no sentido leste-oeste absorveram 13% menos radiação direta do que àqueles posicionados no sentido norte-sul para o solstício de verão no hemisfério norte, sendo a radiação difusa independente da orientação do renque.

Palmer (1977) descreve um modelo matemático modificado para macieira, baseado num trabalho anteriormente desenvolvido por Jackson e Palmer (1972), onde a principal suposição é que o renque possua comprimento infinito e silhueta triangular. O modelo assume que as estruturas da planta estão distribuídas de forma homogênea dentro do volume de renque e a atenuação é uma função logarítmica para

cada estrutura em particular (caule, folhas, frutos), desconsiderando a interação entre ambas. Os dados gerados pelo modelo apresentaram uma boa concordância com os dados medidos de radiação direta e difusa. O mesmo autor fez uso de seu modelo para estudos de interceptação e distribuição de radiação no renque (PALMER, 1989). Para isso ele utilizou-se de pomares em diferentes latitudes e orientações de plantio, com alturas de plantas e espaçamento entre renques diferenciados, e nas diferentes épocas do ano. Os resultados mostraram que a variação da interceptação em função da orientação das linhas de plantio não é única, mas também sofre influência do espaçamento, época do ano e altura de plantas, o que mostra uma grande complexidade no estudo da interceptação radiação em renques, neste caso, de macieiras. Esse tipo de estudo é de fundamental importância para se definir novas técnicas de manejo (orientar arranjo de plantas ou culturas, orientação de plantio, etc) e influenciar os melhoristas de plantas para buscarem cultivares que apresentem alto desempenho em novas conformações de cultivo.

Riou, Valancogne e Pieri (1989) desenvolveram um modelo de interceptação de radiação para a cultura da videira, manejada sob espaldeira, na qual assumem que o renque apresenta geometria em forma de paralelepípedo, e que sua relação com o movimento solar permite a estimativa da interceptação solar pelo renque. Para isso, eles consideram a porosidade do renque, as orientações de renque e do sol, e que a radiação que intercepta o renque é composta por uma fração direta e uma fração difusa. Os valores experimentais obtidos a campo, quando comparados aos valores obtidos pelo modelo, confirmaram a eficiência do modelo em estimar a energia interceptada pela videira, pois apresentaram uma alta concordância nos dados. Isso torna o modelo apto ao uso em espécies com baixa densidade de folhagem e silhueta em forma de paralelepípedo.

Na busca por um modelo que apresentasse bons resultados para diferentes estruturas de cobertura vegetal, desde plantas individuais até coberturas homogêneas, Röhrig, Stützel e Alt (1999) desenvolveram

um modelo tridimensional para estudar o caminho percorrido pela radiação dentro de um dossel. O modelo deveria fornecer informações detalhadas sobre a absorção da radiação nesses dosséis, seguindo rotinas simples e facilmente adaptáveis para outros estudos. O volume total do renque é subdividido em cubos, os quais podem conter ou não estruturas da planta. A energia transmitida através do cubo é calculada em função da trajetória dos raios solares a partir da extremidade superior do dossel até o nível do solo. O cálculo é feito para radiação direta e difusa separadamente, considerando a reflexão e o espalhamento do feixe. Os dados provenientes do modelo foram confrontados com dados obtidos a campo, analisando o efeito de diferentes arquiteturas de plantas na absorção de energia, e os resultados mostraram confiáveis para a transmissividade da energia solar. Mostrou-se promissor na determinação da transmissão de energia entre as copas, mas devido a grande complexidade na obtenção dos dados, é pouco usado.

Melo-Abreu, Snyder e Ribeiro (2002) desenvolveram um modelo que trabalha diferenciando as fontes em radiação direta e difusa, sendo as mesmas integradas a qualquer momento e em qualquer ponto de uma reta que simula o caminho percorrido pelo feixe radioativo, desde o topo do renque até sua base. O modelo foi validado com dados de um pomar de macieira, alcançando resultados satisfatórios e, com isso, tornando-o apto a constituir modelos mais complexos, que utilizem dados de interceptação de radiação como um módulo de cálculo para obtenção de produção, crescimento, ou até mesmo consumo hídrico.

Um modelo tridimensional e de maior complexidade foi desenvolvido por Green et al. (2003), baseado em suposições e modelos desenvolvidos anteriormente, como na teoria de cálculo, adaptada de Norman e Welles (1983) e Wang e Jarvis (1990), e na suposição de que, excetuando-se as folhas, as demais estruturas da planta absorvem menos de 5% da radiação absorvida pela planta como um todo, e a influência dessas estruturas pode ser negligenciada (PALMER, 1977). O modelo considera que a planta apresenta uma forma semelhante

a um elipsóide, e que as folhas estão distribuídas randomicamente dentro do volume de controle. Além disso, a estrutura tridimensional do modelo permite se trabalhar com três dimensões dentro do volume de controle, o que permite uma maior confiabilidade frente aos modelos unidirecionais, e também, permite o estudo do efeito de interceptação de radiação quando o padrão do plantio do pomar varia. As componentes radioativas do modelo, radiação direta e difusa, foram estimadas a partir de medidas de radiação presentes no pomar e a absorção foi calculada em função de comprimentos de ondas, pois as propriedades óticas das folhas (transmissão, reflexão e absorção) dependem desse comprimento.

Pilau (2005) adaptou o modelo desenvolvido para videiras de autoria de Riou, Valancogne e Pieri (1989) para a cultura do cafeeiro, e fez a sua validação a partir de determinação direta, obtida por um sistema integrador espaço-temporal de medidas do saldo de radiação movimentando-se ao longo da linha de plantio, formando uma geometria cilíndrica, com amostragem de quatro plantas. Também foi desenvolvido um modelo para plantas isoladas, aplicado em um pomar de laranjeiras, no qual o equipamento utilizado para obtenção das medidas integrou as medidas em uma esfera nocional. Ambos, os modelos utilizaram dados referentes à orientação solar, a posição de renques, e também referentes à estrutura do renque e da planta. Os modelos consideraram o estudo da radiação direta e difusa de forma distinta, sendo possível explicitar a contribuição da radiação absorvida pelo topo e pelas áreas laterais do renque. Os dados medidos pelo sistema integrador, além de utilizados na aferição dos modelos, foram utilizados para estudar-se a aplicabilidade da lei de Beer para dosséis descontínuos, já que a premissa básica dessa lei é que a atenuação do feixe de radiação depende da concentração ou densidade de folhas e da largura desse volume, o qual o feixe percorre desde o topo até a base do renque. Além disso, os dados medidos foram usados em relações com a irradiância solar global e o saldo de radiação de gramado. Os resultados encontrados pelos modelos tiveram bom ajuste com os dados medidos, além de demonstrar a aplicabilidade do modelo para vários níveis de porosidade e área foliar de plantas.

Oyarzun (2005) desenvolveu um modelo que considera a planta como um corpo poroso de forma prismática. A radiação solar interceptada pelo pomar é obtida pela relação geométrica entre a estrutura do renque, a posição do sol e o comprimento da sombra formada pelas árvores. O modelo baseia-se na diferenciação entre radiação direta e difusa, e em frações de energia interceptada pela cobertura. Os dados estimados pelo modelo foram comparados aos medidos no pomar na escala horária e diurna. A quantidade de radiação interceptada pelo renque foi obtida pela diferença entre os valores de radiação observados em uma estação meteorológica automática e valores médios medidos por tubo-solarímetros (AccuPAR, Decagon Equipamentos Inc., WA, USA) instalados 30cm acima do solo, e movimentados paralelamente a linha de plantio até a metade das entrelinhas subjacentes. Em ambos os casos, a relação foi muito boa, ocorrendo uma melhora do desempenho do modelo quando se trabalhou com os dados na escala diurna. O modelo mostrou-se prático, com aplicabilidade em uma grande gama de espécies frutíferas, diferentes configurações de pomar e condições ambientais variáveis, além disso, necessita de dados que são facilmente obtidos em nível de campo. O autor cita que o modelo pode ser usado para a escolha da orientação do plantio, melhorando a interceptação ao longo de todo o ano, e também que o modelo pode ser incorporado em modelos mais complexos de fotossíntese, produtividade e eficiência do uso de água como um auxiliar para melhora de desempenho.

Não existem recomendações prontas quando se trabalha ou estuda a modelagem da radiação solar. Para cada situação, devemos utilizar o modelo mais adequado. Essa adequação está ligada a oferta de dados e a expertise de quem está trabalhando com o modelo. Modelos mais complexos dão resultados mais robustos, pois consideram maior número de variáveis, mas também exigem mais conhecimento e bancos de dados de grande proporção.

Considerações Finais

A radiação solar absorvida por uma planta é um dos principais determinantes da sua taxa fotossintética e da perda de água através da transpiração e, juntamente a fatores complementares como temperatura do ar e do solo, disponibilidade hídrica e nutrição mineral, condiciona o crescimento e o desenvolvimento vegetal, suas produções e a qualidade destes produtos.

Muitos estudos realizados sobre o uso de radiação solar por plantas envolveram culturas contínuas. Aqueles desenvolvidos para coberturas contínuas, tiveram seu foco voltado a espécies de alta importância agrícola e alto rendimento por área, como pomares. Com a evolução da agricultura e o conceito de intensificação ecológica das áreas utilizadas para este fim, a demanda por estudos que identifiquem as melhores combinações de espécies de plantas e, conseqüentemente, sua melhor distribuição no terreno visando o maior aproveitamento de recursos naturais, gera a necessidade de se retomar estudos sobre o regime radiativo em plantas, não apenas de forma isolada, mas em combinações mais complexas. Muitos modelos ou até mesmo relações radiométricas, citados anteriormente, podem ser testados e servir como base para o desenvolvimento de um modelo eficaz em sistemas complexos como a iLPF.

Em sistemas complexos os estudos de eficiência do uso de radiação e os estudos da distribuição da mesma dentro do sistema, são escassos (sistemas em consócio ou em faixas de culturas agrícolas) ou inexistentes (iLPF). Cabe atenção especial ao desenvolvimento de mecanismos, métodos ou modelos que contribuam para a compreensão dessa interação da radiação, favorecendo a escolha das melhores espécies, da melhor distribuição de plantas e da melhor combinação dentro do sistema a ser adotado, aumentando sua produtividade e sua eficiência.

Diante disso, recomendamos estudos de eficiência de uso de recursos naturais, principalmente no aproveitamento de radiação solar nos sistemas desenvolvidos, pois a cada dia esses recursos se tornam mais escassos. Dentre eles, podemos citar água, energia e insumos que são os elementos essenciais para o crescimento e desenvolvimento de plantas, e exigem uma maior concentração de esforços na busca pelo desenvolvimento de modelos de sistemas mais sustentáveis e produtivos ao longo do tempo.

Referências Bibliográficas

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

ANGELOCCI, L.R et al. Radiation balance of coffee hedgerows. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 3, p. 274-281, 2008.

ANGELOCCI, L.R.; VILLA NOVA, N.A. Medida de saldo de energia radiante na copa de lima ácida "Tahiti" e sua relação com a medida sobre gramado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11; REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 2, 1999. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBA, EPAGRI, p. 2192-2198, 1 CD-ROM.

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

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

ASSUNÇÃO, H.F.; ESCOBEDO J.F.; CARNEIRO, M.A.C. Eficiência de uso da radiação e propriedades óticas da cultura do amendoim. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 38, n. 3, p. 215-222, 2008.

BATERLINK, H.H. Radiation interception by forest trees: A simulation study on effects of stand density and foliage clustering on absorption and transmission. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 105, p. 213-225, 1998.

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

BUTLER, D.R. Estimation of the transpiration rate in an apple orchard from net radiation and vapour pressure deficit measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 16, p. 277-289, 1976.

CHARLES-EDWARDS, D.A.; THORNLEY, J.H.M. Light interception by an isolated plant. A simple model. **Annals of Botany**, London, v. 37, p. 919-928, 1973.

CHARLES-EDWARDS, D.A.; THORPE, M.R. Interception of diffuse and direct-beam radiation by a hedgerow apple orchard. **Annals of Botany**, London, v. 40, p. 603-613, 1976.

CONSOLI, S.; O'CONNELL, N.; SNYDER, R. Measurements of light interception by orange orchard canopies: the case study of Lindsay (California). **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Amsterdam, v. 132, p. 9-20, 2006.

CORREA, S.T.R. et al. Aplicações e limitações da modelagem em agricultura – revisão. **Revista de agricultura**, Piracicaba, v. 86, n. 1, p. 1-13, 2011.

DÍAZ-AMBRONA, C.H.; TARQUIS, A.; MÍNGUEZ, M.I..Faba bean canopy modelling with a parametric open L-system: a comparison with the Monsi and Saeki model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 58, p. 1–13, 1998.

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

GREEN, S.R. Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 64, p. 201-221, 1993.

GREEN, S.R.; McNAUGHTON, K.G.; WÜNSCHE, J.N.; CLOTHIER, B. Modeling light interception and transpiration of apple canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 1380-1387, 2003.

GUTIÉRREZ, M.V.; MEINZER, F.C. Energy balance and latent heat flux partitioning in coffee hedgerows at different stages of canopy development. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 68, p. 173-186, 1994.

JACKSON, J.E.; PALMER, J.W. Interception of light by model hedgerow orchards in relation to latitude, time of year and hedgerow configuration and orientation. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 9, p. 341-358, 1972.

JACKSON, J.E.; PALMER, J.W. A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. **Annals of Botany**, London, v. 44, p. 381-383, 1979.

KUNZ, J.H.; BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; HECKLER, B.M.M.; COMIRAN, F. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 42, n. 11, p. 1511-1520, 2007.

LANDSBERG, J.J. Diurnal energy, water and CO₂ exchanges in an apple (*Malus pumila*) orchard. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 12, p. 645-683, 1975.

LAPPI, J.; STENBERG, P. Joint effect of angular distribution of radiation and spatial pattern of trees on radiation interception. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 112, p. 45-51, 1998.

LEMEUR, R. A method for simulating the direct solar radiation regime in sunflower, Jerusalem artichoke, corn and soybean canopies using actual stand structure data. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 12, p. 229-247, 1973.

MARIN, F.R. **Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado**. 2003. 118 p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

MARISCAL, M.J.; ORGAZ, F.; VILLALOBOS, F.J. Radiation-use efficiency and dry matter partitioning of a young olive (*Olea europaea*) orchard. **Tree Physiology**, Oxford, v. 20, p. 65-72, 2000.

McNAUGHTON, K.G.; GREEN, S.R.; BLACK, T.A.; TYNAN, B.R.; EDWARDS, W.R.N. Direct measurement of net radiation and photosynthetically active radiation absorbed by a single plant. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 62, p. 87-107, 1992.

MELO-ABREU, P.; SNYDER, R.L.; RIBEIRO, A.C. Modeling radiation transmission, interception and reflection in a hedgerow apple orchard in the northeastern Portugal. **Acta Horticulturae**, Davis, v. 584, p. 73-80, 2002.

MONSI, M.; SAEKI, T. Über den lichtfaktor in den pflanzen-gesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion. **Japanese Journal of Botany**, Tokio, v. 14, p. 22-52, 1953.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. **Symposium of Society of Experimental Biology**, Cambridge, v. 19, p. 205-234, 1965.

MUNZ, S.; FEIKE, T.; CHENC, Q.; CLAUPEINA, W.; GRAEFF-HÖNNINGER, S. Understanding interactions between cropping pattern, maize cultivar and the local environment in strip-intercropping systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 195-196, p. 152-164, 2014.

MUNZ, S.; GRAEFF-HÖNNINGER, S.; LIZASO, J.I.; CHENC, Q.; CLAUPEIN, W. Modeling light availability for a subordinate crop within a strip-intercropping system. **Field Crops Research**, v. 155, p. 77 - 89, 2014.

NORMAN, J.M.; WELLES, J.M. Radiative transfer in an array of canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 481-488, 1983.

NUTMAN, F.J. Studies of the physiology of Coffee arabica L. III Transpiration rates of the whole trees in relation to natural environmental conditions. **Annals of Botany**, London, v. 5, n. 17, p. 59-81, 1941.

OYARZUN, R.L. **Measurements and modeling of plant hydraulic conductance and solar radiation transfer processes in fruit tree orchards, with special reference to sweet cherry**, 2005, 188p. (Ph.D. Dissertation), Washington State University, Washington, 2005.

OYARZUN, R.A.; STOCKLE, C.O.; WHITING, M.D. A simple approach to modeling radiation interception by fruit tree orchards. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 142, p. 12-24, 2007.

PALMER, J.W. Diurnal light interception and a computer model of light interception by hedgerow apple orchards. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 14, p. 601-614, 1977.

PALMER, J.W. The effect of row orientation, tree height, time of year and latitude on light interception and distribution in model apple hedgerow canopies. **Journal of Horticultural Science**, Coventry, v. 64, n. 2, p. 137-145, 1989.

PALMER, J.W., JACKSON, J.E. Seasonal light interception and canopy development in hedgerow and bed system apple orchards. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 14, p. 539-549, 1977.

PEREIRA, A.; GREEN, S.R.; VILLA NOVA, N. Penman Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 83, n. 1, p. 153-161, 2006.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; VILLA NOVA, N.A.; SENTELHAS, P.C. Estimating single tree net radiation using grass net radiation and tree leaf area. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 187-192, 2001.

PILAU, F.G. **Saldo de radiação da copa de laranjeira num pomar e de renques de cafeeiros: medidas e estimativas**, 2005, 92p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola)– Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

PILAU, F.G.; ANGELOCCI, L.R.; SCARPARE FILHO, J.A. Radiation balance of an orange tree in orchard and its relation with global solar radiation and grass net radiation. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, v. 15, p. 257-266, 2007.

PROCTOR, J.T.A.; KYLE, W.J.; DAVIES, J.A. The radiation balance of an apple tree. **Canadian Journal of Botany**, New York, v. 50, p. 1731-1740. 1972.

RIDAO, E.; OLIVEIRA, C.F.; CONDE, J.R.; MINGUEZ, M.I. Radiation interception and use, and spectral reflectance of contrasting canopies of autumn sown faba beans and semi-leafless peas. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 79, p. 183-203, 1996.

RIOU, C.; VALANCOGNE, C.; PIERI, P. Um modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne – vérification expérimentale. **Agronomie**, Paris, v. 9, p. 441-450, 1989.

RÖHRIG, M.; STÜTZEL, H.; ALT, C. A three-dimensional approach to modeling light interception in heterogeneous canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, p. 1024-1032, 1999.

SIMON, J.; ANGELOCCI, L.R.; SCARPARE, F.V.; IRIGOYEN, A.I. Sistema de medidas para saldo de radiação em renques de espécies arbóreas: uso em lima ácida. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16, 2009. Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2009, 1 CD-ROM.

SIMON, J. **Medições do saldo de radiação em copas de cafeeiros e limeiras ácidas por sistemas de integração espaço-temporal e estimativas por técnicas de modelagem**. 2010. 112 p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

STANHILL, G.; HOFSTEDE, G.J.; KALMA, J.D. Radiation balance and natural agricultural vegetation. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, Berkshire, v. 92, p. 128-140, 1965.

STEWART, D.W.; COSTA, C.; DWYER, L.M.; SMITH, D.L.; HAMILTON, R.I.; MA, B.L. Canopy structure, light interception and photosynthesis in maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 1465-1474, 2003.

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

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

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

WARREN WILSON, J. Analysis of light interception by single plants. **Annals of Botany**, London, v. 48, p. 501-505, 1981.

WEISS, A.; NORMAN, J.M. Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared components. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 34, p. 205–213, 1985.

Embrapa

Pesca e Aquicultura

Ministério da
**Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA