

Disponibilidade de energia radiante e acúmulo de fitomassa do feijoeiro em um sistema agroflorestal com seringueiras

Available radiant energy and bean phytomass accumulation in an agroforestry system with rubber trees

Ciro Abbud Righi¹, Marcos Silveira Bernardes²

Resumo: As interações em um Sistema Agroflorestal (SAF) entre os componentes arbóreos e não arbóreos são afetadas principalmente pelo microclima e pelo solo, sendo as quatro principais interações negativas: (i) disposição, (ii) sombreamento, (iii) competição por água e (iv) por nutrientes. Neste trabalho foi quantificada a radiação solar disponível aos feijoeiros cultivados em SAF de seringueiras utilizando-se tubos solarímetros e avaliado o seu efeito sobre o acúmulo de matéria seca em duas épocas de cultivo. Foi observado que a disponibilidade de radiação (I_r) medida para a cultura intercalar seguiu a equação do modelo de irradiância proposto por GOUDRIAAN (1977) e adaptado por BERNARDES et al. (1998), com boa aproximação entre os valores observados, $I_r = \frac{1}{2} \sin\{\arctg\{[(d-(cw*cw/d))/hr]+D\}+1\} * I_0$ sendo: I_0 a irradiância em uma superfície horizontal acima das copas das árvores; hr a altura relativa das árvores (altura da árvore - altura da cultura intercalar); cw a largura da copa (m); D o declive do terreno (radianos) e d a distância entre o topo das árvores. A mensuração ou estimativa da irradiância relativa disponível aos feijoeiros está direta e positivamente relacionada com a produção de fitomassa relativa podendo ser utilizada na predição desta última em SAF. O decréscimo na disponibilidade de radiação é o principal fator para a redução do crescimento dos feijoeiros mais próximos às árvores.

Palavras-chave: irradiância; modelo matemático; microclima; *Hevea brasiliensis*; *Phaseolus vulgaris*

Abstract: The interactions in an Agroforestry System (AFS) between its trees and associated crops are affected mainly by the microclimate and the soil. The four major negative interactions are: (i) disposition, (ii) shadow, (iii) water and; (iv) nutrient competition. The solar radiation available to beans in an AFS with rubber trees was quantified using solarimeter tubes and it was related with their dry matter accumulation in two growing seasons. It was observed that the measured irradiance (I_r) available to the associated crop could be described by the equation of the model of available irradiance proposed by GOUDRIAAN (1977) and adapted by BERNARDES et al. (1998), with good approximation between observed values $I_r = \frac{1}{2} \sin\{\arctg\{[(d-(cw*cw/d))/hr]+D\}+1\} * I_0$, being: I_0 irradiance in a flat surface above the tree canopies; hr tree relative height (tree height - associated crop height); cw crown width (m); $slope$ of the land (radians) and d distance between the tree tops. The measurement or estimative of the available irradiance to the inter crop is directly and positively related with bean's relative dry matter accumulation and can be used for its prediction in AFS. Reduction of available irradiation is the main factor of decreasing growth rate in beans near the trees.

Keywords: irradiance; mathematical model; microclimate; *Hevea brasiliensis*; *Phaseolus vulgaris*

Introdução

Sistema Agroflorestal (SAF), na sua definição mais aceita, é um sistema de uso da terra que envolve a permanência deliberada, introdução ou retenção de árvores ou outras culturas arbóreas perenes em associação com culturas anuais ou animais com mútuo benefício resultante das interações ecológicas e econômicas (NAIR, 1984). Este sistema pode apresentar várias disposições em espaço e tempo e deve ser compatível com as práticas de manejo da população

local (NAIR, 1984; YOUNG, 1989).

Na instalação de árvores com espaçamento convencional, há inicialmente abundância de radiação solar, umidade e nutrientes no solo, podendo as culturas intercalares desenvolverem-se de modo satisfatório, até que tais fatores de crescimento tornem-se limitantes. A densidade reduzida do plantio das árvores ou em consórcio com plantas tolerantes ao sombreamento e mais competitivas por água e nutrientes, são formas mais duradoura de uso do solo (WESSEL, 1990),

¹ Dr. em Fitotecnia, ESALQ/USP, Dep. Produção Vegetal - Av. Pádua Dias, 11 - Cx.P. 09, CEP: 13418-900 Piracicaba/SP - Brasil; Tel.: (19) 3429-4115 r.32, e-mail: carighi@yahoo.com

² Prof. Dr. Dep. Produção Vegetal, ESALQ/USP, Av. Pádua Dias, 11 - Cx.P. 09, CEP: 13418-900 Piracicaba/SP - Brasil; Tel.: (19) 3429-4115 r.32, e-mail: msbernar@esalq.usp.br

transformando monocultivos de árvores em SAFs.

SAFs vêm sendo apontados como opção preferencial de uso da terra, por terem um elevado potencial para aumentar sua sustentabilidade, quanto a aspectos agrônômicos, sociais, econômicos e ecológicos. Os sistemas agroflorestais aparecem como alternativa promissora para lidar com problemas de degradação do solo, principalmente em regiões tropicais úmidas, caracterizadas por solos de baixa fertilidade. Desta maneira as árvores deste sistema irão contribuir para um manejo mais racional destas áreas através de: (i) conservação do lençol freático, (ii) controle do vento, (iii) controle da erosão, (iv) reciclagem de nutrientes, (v) produção de madeira, frutas, resinas, etc., (vi) agregar valor comercial às áreas destinadas à sua instalação (BERNARDES, 1993).

As copas das plantas têm um papel importante no crescimento e na produtividade. A eficiência fotossintética de uma copa é afetada pela taxa fotossintética por unidade de área foliar e pela forma como a radiação solar é interceptada. A interceptação da radiação depende das características da copa, como arquitetura e dimensão (BERNARDES, 1996). Variações nos processos básicos da fotossíntese asseguram que certos organismos são capazes de manter alta produtividade sob condições ambientais específicas (HOPKINS, 1995), sendo a resposta à baixa intensidade luminosa crucial para as folhas da parte basal das copas, em especial às plantas herbáceas associadas. Para permitir total exploração do gradiente de radiação solar, as plantas devem adaptar-se às diferentes situações de irradiação solar.

A eficiência do processo fotossintético está estritamente relacionada à distribuição e interceptação da radiação solar pelas diferentes plantas que constituem um sistema (WHITE & IZQUIERDO, 1989). GARDINER et al. (1979) e BURGA (1978) verificaram que as folhas do feijoeiro têm orientação fortemente horizontal, porém podem assumir posições mais eretas em plantios mais adensados. Deste modo o feijoeiro diminui o coeficiente de extinção da radiação solar (k), permitindo uma maior interceptação da radiação pela copa.

O SAF de seringueira (*Hevea spp.*) e feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) é relatado em diversos países tropicais, também sendo utilizado no Brasil. Este tipo de combinação apresenta diversas vantagens em termos de produtividade e retorno econômico (ZHU et al., 1981). Todavia, os processos fisiológicos envolvidos na interação entre as duas espécies não estão devidamente compreendidos.

O consórcio do feijoeiro com seringueiras jovens normalmente reduz o período de imaturidade das árvores, possibilitando assim um retorno econômico antecipado. Há evidências de que o intercultivo reduz a competição da seringueira com plantas daninhas, diminui a erosão do solo e melhora a fertilidade deste. A seringueira aproveita ainda o nitrogênio fixado pelo feijoeiro e pode atuar como quebra-vento favorecendo o crescimento e o rendimento deste (FANCELLI et al., 1984; FANCELLI, 1990).

A quantificação dos fatores ambientais e as respostas das plantas podem ser agregados em modelos matemáticos para expandir e aperfeiçoar o seu uso prático e científico. Um melhor entendimento das interações ecofisiológicas dentro do SAF irá direcionar novas questões científicas, mas também aprimorar o manejo das culturas envolvidas. O aprimoramento tecnológico e um resultante maior rendimento facilitarão a adoção do SAF em questão por um maior número de produtores rurais. Expandindo a diversidade de culturas, com a introdução da seringueira nas regiões onde o feijão é produzido na forma de monocultura, poderá ser incrementada a sustentabilidade na produção. A utilização de modelos matemáticos, assim como o planejamento prévio da pesquisa, é mais importante em sistemas agroflorestais do que em sistemas de monocultivo. O enfoque puramente experimental em agrossilvicultura é excessivamente caro devido: (i) a longevidade das árvores, (ii) o tamanho das parcelas experimentais e (iii) ao grande número de possíveis disposições em relação ao tempo e espaço. Faz-se necessário uma avaliação prévia da literatura existente bem como o desenvolvimento e a utilização de modelos matemáticos (e seu aprimoramento) para testar previamente as hipóteses levantadas (BERNARDES, 1993).

Enquanto o desenvolvimento de um modelo da cultura como um todo é uma meta a longo prazo, provisoriamente os módulos individuais de processos podem exercer um papel importante não apenas no entendimento do SAF, mas também na predição de seu desempenho.

O entendimento de como os SAFs utilizam os recursos disponíveis é fundamental para o estabelecimento de combinações de espécies, arranjo da plantação, densidade de plantio e manejo adequado para diferentes localidades. O estudo dos princípios da captação de recursos em SAF é útil na análise de desempenho das culturas envolvidas sob várias condições de clima e manejo (ONG et al., 1996; WILLEY & REDDY, 1981).

Este estudo teve por objetivo melhor compreender o efeito da interceptação/transmissão da radiação solar pelas árvores de seringueira em renque no acúmulo de fitomassa do feijoeiro submetido a diversas disponibilidades de radiação solar.

Hipotetizou-se que o acúmulo em fitomassa da cultura intercalar possui relação direta com a disponibilidade de radiação solar.

Material e Métodos

Avaliação da cultura consorciada

O ensaio foi desenvolvido no seringal do campo experimental do Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP, em Piracicaba/SP (22°42'30"S. 47°38'00"O.) a uma altitude média de 540m. De acordo com SENTELHAS et al. (1998), o clima da região é definido como sub-tropical úmido, com verão chuvoso e seca de inverno, sendo identificado como Cwa segundo a classificação de Köppen. A temperatura média anual é de 21,4°C, com temperaturas médias mensais de 24,8°C no verão e 17,1 °C no inverno. A precipitação média anual é de 1.278 mm distribuídos em 1.000 mm de outubro a março e 278 mm entre abril a setembro. O campo é cultivado com seringueiras adultas com 13 anos de idade, plantadas em espaçamento 7m x 3m, em um Nitossolo vermelho eutroférico (Terra Roxa Estruturada) (EMBRAPA, 2006), em declividade de 1,5%. A cultura do feijoeiro foi semeada em faixa a montante e ao lado das seringueiras em duas épocas: (i) em 15 de março de 1999 (outono) e; (ii) em 15 de julho de 1999 (inverno). Foram utilizadas sementes de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Pérola, de hábito de crescimento indeterminado tipo II / III. O espaçamento adotado foi de 0,45 m entre-linhas, com 20 plantas por metro linear. Na Figura 1 pode-se observar um desenho esquemático da seção transversal da área experimental evidenciando a disposição das culturas no campo.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados com quatro repetições. Em cada bloco existiam parcelas (i) sem e (ii) com a inserção de uma lona plástica abaixo do nível do solo para a separação das raízes das culturas até a profundidade de 1,5m, evitando-se assim a competição por água e nutrientes de acordo com a metodologia descrita por WILLEY & REDDY (1981). Cada parcela experimental foi constituída de uma área de 15m x 30m, sendo que em cada uma delas havia duas fileiras de seringueira, cada uma com seis árvores. A primeira fileira na interface com a cultura de feijoeiro é representativa de árvores em SAF em renque de linha dupla. A distância entre as parcelas (42m) era suficiente para impedimento da interferência mútua.

No manejo de ambas as culturas, incluindo-se irrigação por aspersão, evitaram-se limitações ao crescimento e à produção, exceto aquelas devidas aos tratamentos experimentais, como de competição por radiação solar e abaixo da superfície do solo.

A evapotranspiração da cultura do feijoeiro foi estimada pelo uso de um tanque Classe A instalado na área experimental. A lâmina de irrigação foi calculada de acordo com método proposto por VILLA NOVA & SENTELHAS (1999), em que se estima a

evapotranspiração da cultura pela medida do índice de área foliar (IAF) e da evaporação do tanque Classe A.

A fitomassa dos feijoeiros foi mensurada em função da distância das árvores quando aqueles se encontravam no estágio fenológico R9 (GEPTS & FERNÁNDEZ, 1982). Os tratamentos foram representados pelas posições de coleta situadas a 3,2; 4,5; 6,3; 9,9; 14,4 e 18,9m de distância, contadas a partir da primeira fileira de plantio de seringueira e nas parcelas do tratamento de monocultivo, situadas a 50m das árvores. Todas as plantas em 1m de duas linhas de plantio foram coletadas e secas em estufa a 65°C até peso constante. Todas as seringueiras existentes no experimento foram medidas em (i) altura, utilizando-se o altímetro de Haga e (ii) na largura de sua copa (raio) voltada para a cultura do feijoeiro, diretamente com o uso de uma trena. A altura da cultura do feijoeiro foi medida diretamente com uma trena em várias repetições aleatórias.

Medidas Microclimáticas

Nas mesmas posições de coleta de amostras de fitomassa, foi quantificada durante todo o período experimental a disponibilidade de radiação solar direta, refletida e transmitida pelas seringueiras à cultura intercalar. Utilizou-se para tanto seis tubos solarímetros (TS-UM-3, Delta-T Devices) conectados a um sistema de aquisição de dados (data-logger, Delta-T Devices) instalados imediatamente acima da copa dos feijoeiros. A irradiância disponível aos feijoeiros em monocultivo foi considerada como aquela mensurada por um piranômetro da estação meteorológica pertencente ao Departamento de Ciências Exatas – ESALQ/USP, localizada próxima ao experimento. Os sensores foram calibrados com base em um piranômetro padrão – Eppley

Adotou-se o modelo matemático originalmente proposto por GOUDRIAAN (1977) e adaptado por BERNARDES et al. (1998), com o qual se calcula a irradiância relativa (I_r) disponível à cultura intercalar em função da distância da linha de seringueira (d em metros):

$$I_r = \frac{1}{2} * sen \left\{ \arctg \left(\frac{d - c_w * \frac{c_w}{d} + D}{H_r} \right) + 1 \right\} * I_0 \quad (1)$$

em que, I_r = irradiância diária ($MJ.m^{-2}$); I_0 = irradiância diária ($MJ.m^{-2}$) numa superfície horizontal acima da copa das árvores; c_w = largura da copa das árvores (m); D = declividade em radianos e H_r = altura (m) relativa das árvores obtida pela seguinte equação:

$$H_r = H_{árv} - H_{ci} \quad (2)$$

onde $H_{árv}$ = altura das árvores (m) e H_{ci} = altura da cultura intercalar.

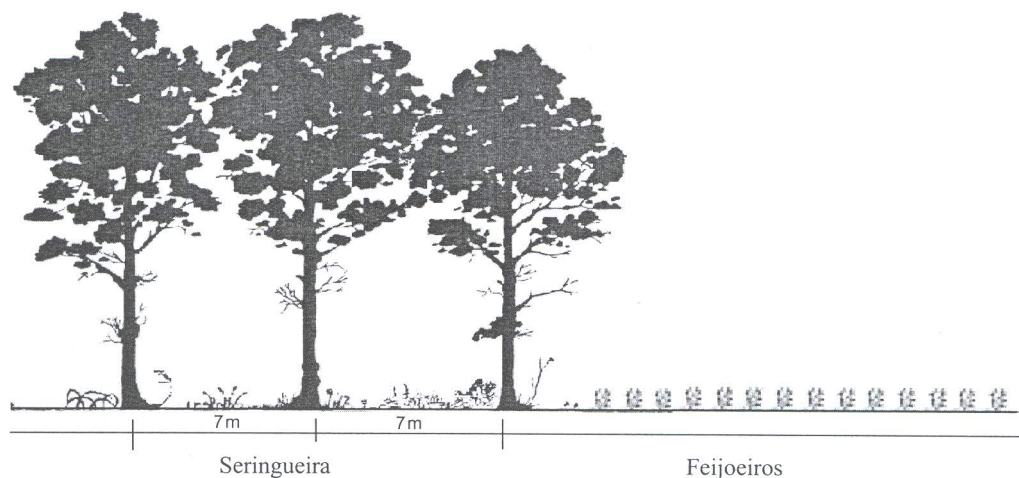


Figura 1. Desenho esquemático da seção transversal da área experimental onde se pode visualizar a disposição das culturas – seringueira (*Hevea spp.*) e feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*).

O modelo matemático não leva em consideração a orientação do plantio das árvores nem tampouco a posição da cultura intercalar. Tal modelo calcula a fração da abóbada celeste que emite radiação difusa para um determinado ponto no topo da copa da cultura intercalar e assume que essa fração é similar para a radiação direta, considerando a escala temporal unitária de um dia integrando-se as diferentes elevações solares não interceptadas pelas copas das árvores. Ademais, considera que o renque de árvores atua como um corpo negro, sem transmissão ou reflexão de radiação.

O modelo foi inicialmente utilizado para a estimativa da fração da irradiância disponível em um ponto entre duas fileiras sem considerar o declive do terreno, situação suprida pela altura relativa das árvores (Hr).

Na simplificação proposta por BERNARDES et al. (1998) com a aléia de árvores em somente um dos lados, como é o caso deste experimento (Figura 1), o declive deve ser considerado. Se a cultura intercalar está à montante em relação à aléia, o declive deve ser somado ao ângulo para incluir o abaixamento do topo das árvores e assim o aumento da fração da abóbada celeste. Para o lado inverso o declive deve ser subtraído. Em condições de plantios comerciais a orientação das fileiras obedece outros fatores mais importantes do que a disponibilidade de energia radiante, tal como o plantio em nível em contorno. Deste modo este modelo possui uma grande aplicabilidade podendo ser facilmente utilizado em uma ampla gama de condições.

Os resultados foram analisados em delineamento de parcelas subdivididas em faixas (*strip-plot*) considerando-se cada posição de coleta de fitomassa do feijoeiro como um tratamento.

Resultados e Discussão

Os resultados das medições e simulações da disponibilidade de radiação solar ao feijoeiro nas diversas distâncias em relação à seringueira podem ser visualizados nas Figuras 2 e 3 referentes aos cultivos de outono e de inverno respectivamente. Nestas figuras são apresentados os valores da fração das integrais da radiação diária em cada posição avaliada (pontos) e aquela simulada pelo modelo utilizado (linha). Os valores medidos são relativos ao piranômetro que representa a condição de irradiância do feijoeiro em monocultivo.

A altura média encontrada para a seringueira foi 13,65m, sua largura de copa média foi 5,19m e a altura do feijoeiro 0,50m em ambos os plantios. Como se pode observar as frações médias da radiação disponível ao feijoeiro no cultivo de outono variaram de 0,20; 0,29; 0,28; 0,50; 0,67 e 0,86 para as distâncias das árvores de 3,2; 4,5; 6,3; 9,9; 14,4 e 18,9m, respectivamente. No cultivo de inverno esta variação foi de 0,29; 0,35; 0,40; 0,61; 0,68 e 0,83 para as mesmas posições de coleta. A irradiância disponível às quatro primeiras distâncias foram em média 30% maior no segundo cultivo em relação ao primeiro.

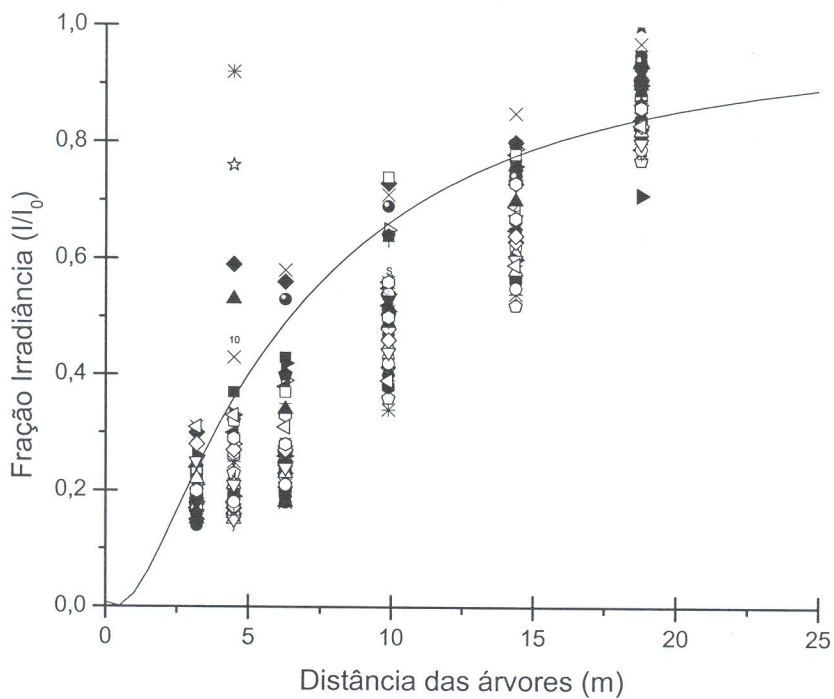


Figura 2. Fração da irradiância disponível aos feijoeiros medida (pontos) e simulada pelo modelo de Goudriaan (1977) e adaptado por Bernardes et al. (1998) (---) em função da distância das árvores de seringueira, no cultivo de outono em um sistema agroflorestal com seringueiras. Piracicaba, SP, 1999.

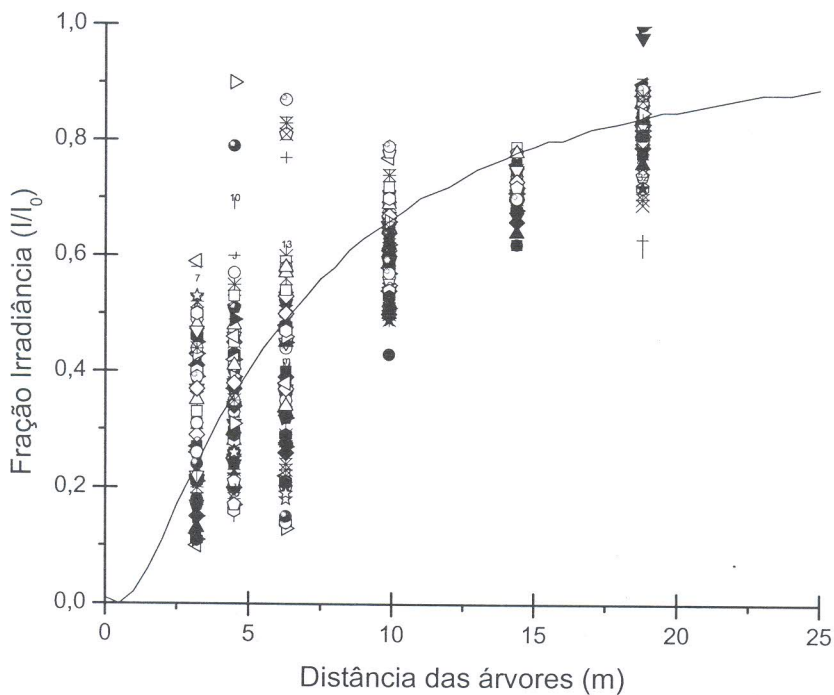


Figura 3. Fração da irradiância disponível aos feijoeiros medida (pontos) e simulada pelo modelo de Goudriaan (1977) e adaptado por Bernardes et al. (1998) (---) em função da distância das árvores de seringueira, no cultivo de inverno em um sistema agroflorestal com seringueiras. Piracicaba, SP, 1999.

Verificam-se diferenças entre mensurações e simulações da fração de radiação solar nas distâncias até 6,3m da fileira de árvores, sendo mais evidente no cultivo de inverno. Tais diferenças provavelmente são devidas à reflexão e transmissão de radiação pelas copas das árvores, fazendo com que as frações medidas de radiação sejam superiores às frações simuladas. O modelo deveria ser aprimorado nesse sentido, incluindo cálculo desses processos.

A maior interceptação da radiação solar pelas seringueiras ocorreu na época do verão/outono, sendo bastante atenuada na medida em que se próxima desta (1º plantio) como consequência de seu enfolhamento.

No cultivo de inverno (2º plantio) a radiação disponível aos feijoeiros nas linhas mais próximas das árvores foi maior. Neste caso, até a distância de 9,9 metros das seringueiras a fração da radiação disponível ao feijoeiro foi superior aos resultados obtidos no primeiro cultivo. Somente após a distância de 14,4 metros os valores obtidos nos dois cultivos iguaram-se. Tal variação foi devida ao comportamento decíduo que a seringueira apresenta na região sudeste do país, tendo sido tal padrão descrito por RIGHI et al. (2003) através da mensuração do seu índice de área foliar (IAF).

No cultivo de outono, a fitomassa do feijoeiro nas diferentes distâncias da seringueira apresentou uma relação linear com a disponibilidade de radiação solar. Nas distâncias analisadas, o feijoeiro produziu em média um total de fitomassa de 1.850,94; 2.359,00; 2.896,69; 3.691,83; 4.753,40; 5.658,17 e 6.986,09 kg.ha⁻¹, respectivamente para as distâncias das árvores de 3,2; 4,5; 6,3; 9,9; 14,4; 18,9m e testemunha (monocultivo) do feijoeiro. A produção em fitomassa se estabilizou em um patamar igual ao encontrado na testemunha a partir desta última posição. Pode-se considerar que as árvores atuaram de modo a reduzir o desempenho do feijoeiro até a distância de 18,9m delas.

Tal padrão de produção em fitomassa foi atribuído à maior disponibilidade de radiação solar aos feijoeiros dada sua distância às árvores, como já observado por BERNARDES et al. (1998) em soja. As seringueira em SAF apresentaram nesse período seu enfolhamento máximo, alcançando os maiores valores de IAF em abril/1999, entre 2,15 e 3,17 (RIGHI et al. 2003).

A produção de fitomassa do feijoeiro no cultivo de inverno apresentou um padrão diferenciado do cultivo de outono. Os totais de fitomassa produzidos foram de 2.626,17; 3.970,58; 4.175,25; 5.607,47; 6.201,08; 6.284,79 e 5.626,69 kg.ha⁻¹ respectivamente para as distâncias das árvores de 3,2; 4,5; 6,3; 9,9; 14,4; 18,9m e testemunha do feijoeiro. Apesar de tratar-se de um cultivo de inverno (plantio realizado em 15/07), nas posições mais próximas às árvores, até 14,4m de distância delas, a fitomassa produzida foi superior àquela do primeiro cultivo. Ainda, no cultivo de inverno pôde-se observar valores máximos de produção de fitomassa ao redor da distância de 9,9m das árvores. A partir desta posição, a produção em fitomassa estabilizou-se em um patamar ao redor de 6.000 kg.ha⁻¹, inclusive na testemunha.

O decréscimo da produção de fitomassa dos feijoeiros em monocultivo no cultivo de inverno, tanto em relação ao cultivo anterior como em relação à última distância analisada é um fato importante a ser notado. Nesta época do ano, os feijoeiros em monocultivo ficaram mais expostos às variações climáticas, alcançando valores de produção de fitomassa ligeiramente inferiores aos feijoeiros em SAF à distância de 18,9 m das árvores. Na análise do cultivo de inverno, a queda de produção de fitomassa da testemunha com relação à distância imediatamente anterior não foi significativa estatisticamente. A maior disponibilidade de radiação solar para a fotossíntese aos feijoeiros em monocultivo não foi suficiente para aumentar sua produção, como ocorreu com os feijoeiros em monocultivo no cultivo de outono.

Vale a pena ressaltar que as árvores de seringueira apresentam acentuada cadufolia no inverno, obtendo-se valores mínimos de IAF ao redor do final de julho/meados de agosto (RIGHI et al., 2003). A influência das árvores sobre o feijoeiro nesta época do ano foi, portanto, menor que a apresentada durante o outono. Provavelmente as árvores de seringueira atuaram de modo a reduzir as amplitudes térmicas encontradas durante o dia em áreas desabrigadas. Deste modo estas contribuíram para que nas áreas sob sua interferência a temperatura mínima fosse maior e a temperatura máxima menor, sendo tal fato descrito por LARCHER (1975).

Nas Figuras 4 e 5 pode-se observar que a fração de fitomassa da parte aérea do feijoeiro, dada pela relação entre a massa medida nos tratamentos e a medida na testemunha, têm uma estreita relação com a fração de irradiância (I/I_0) que atinge o topo das copas dos feijoeiros em ambas as épocas de cultivo.

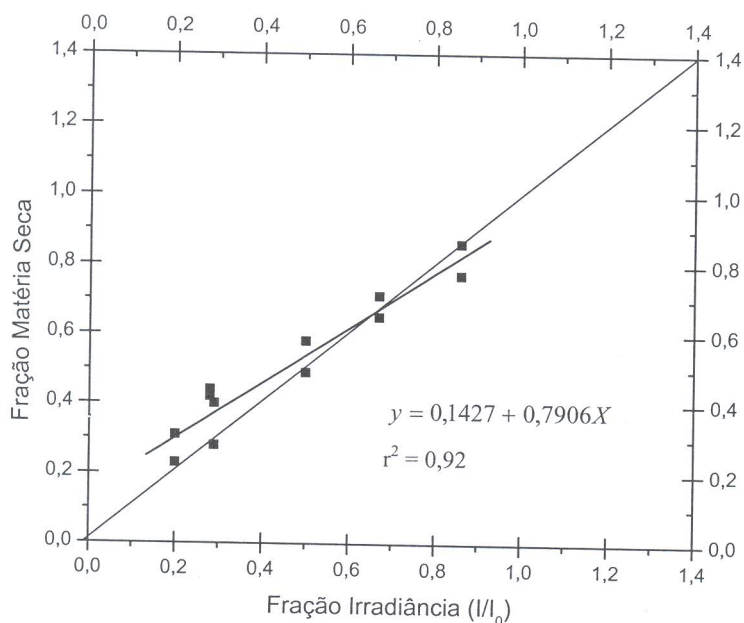


Figura 4. Regressão linear entre a massa relativa de fitomassa da parte aérea da cultura do feijoeiro, cultivar Pérola - calculada pela relação entre a massa medida nos tratamentos e a medida na testemunha - e a fração da radiação disponível a estes no cultivo de outono em um sistema agroflorestal com seringueiras. Piracicaba, SP, 1999.

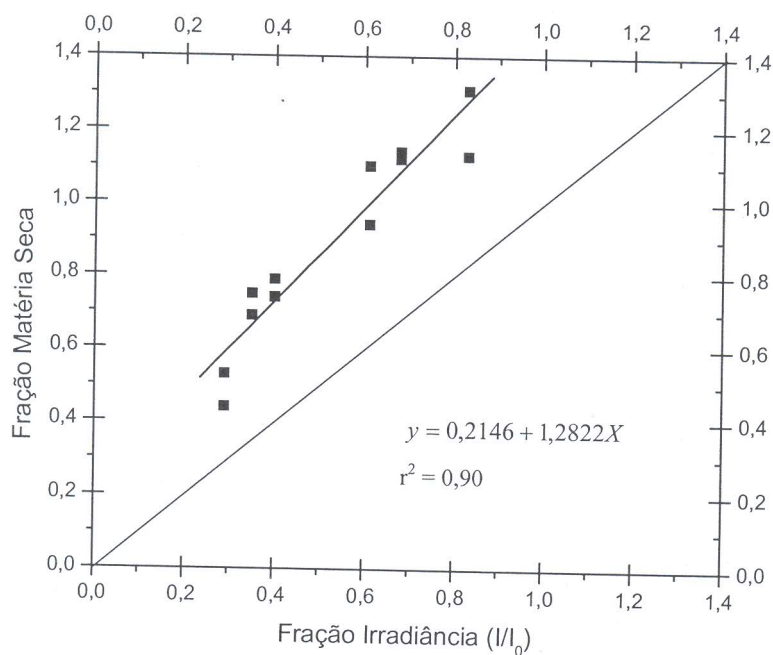


Figura 5. Regressão linear entre a massa relativa de fitomassa da parte aérea da cultura do feijoeiro, cultivar Pérola - calculada pela relação entre a massa medida nos tratamentos e a medida na testemunha - e a fração da radiação disponível aos feijoeiros no cultivo de inverno em um sistema agroflorestal com seringueiras. Piracicaba, SP, 1999.

Pode-se notar que no cultivo de outono o decréscimo na disponibilidade de radiação foi o principal fator para a redução do crescimento dos feijoeiros mais próximos das árvores, fato também observado por RIGHI & BERNARDES (1999). Já no cultivo de inverno houve redução da disponibilidade de radiação aos feijoeiros mais próximos das árvores, em função do desfolhamento das seringueiras, como anteriormente comentado. Em ambos os cultivos obtiveram as correlações lineares da matéria seca acumulada com a disponibilidade de radiação de grande aproximação, apresentando valores de r^2 de 0,92 e 0,90 para os cultivos de outono e inverno, respectivamente. No cultivo de outono ocorreu uma regressão próxima da linha 1:1, demonstrando uma estreita relação de disponibilidade luminica e produção de matéria seca. A linha de tendência cruza a linha 1:1 na posição de 14,4m de distância das árvores onde os feijoeiros receberam cerca de 70% da irradiância total. Observa-se que para frações de radiação menores que este porcentual, a fração da matéria seca produzida foi relativamente cada vez maior. Tal fato provavelmente deve-se a um aumento da eficiência do uso da radiação e u aumento da área foliar específica nas áreas mais sombreadas, como observado por RIGHI (2000).

De outro modo, no cultivo de inverno o coeficiente linear encontrado foi de 1,28, indicando uma maior inclinação da reta, apesar da mesma tendência (Figura 5). Nesse cultivo ocorreu um acúmulo de matéria seca dos feijoeiros, de modo distinto do primeiro, com a fitomassa produzida acima da linha 1:1. Tal fato apreça indicar um aumento da eficiência do uso da radiação pelos feijoeiros (plantas de ciclo C3) nessa época do ano, causada talvez pela menor temperatura do ar a que estavam submetidos. As diferenças de configuração, nos seus coeficientes lineares e angulares das duas equações de regressão (Figuras 4 e 5), uma de cada época de cultivo, provavelmente representem diferentes intensidades de fatores que não a disponibilidade de radiação.

PINTO et al. (2005) também encontraram tendência linear de produção de matéria seca com a radiação em cana-de-açúcar. Porém a inclinação desta reta apresentava-se muito mais acentuada, indicando a menor adaptação de plantas de ciclo C₄ a reduções na luminosidade. Na distância de 9,9m das seringueiras com cerca de 60% da radiação disponível, o total de matéria seca acumulada foi igual ao dos feijoeiros em monocultivo. Nas distâncias de 14,4 e 18,9m das seringueiras, com 68 e 83% da irradiância disponível respectivamente, o acúmulo de matéria seca foi superior ao encontrado em monocultivo em cerca de 10%. Parece que nessas posições ocorreu um efeito de proteção das árvores à cultura do feijoeiro, evitando que este ficasse exposto às menores temperaturas do ar características do inverno nesta região, o que levaria a este maior acúmulo de matéria seca,

apesar da maior disponibilidade de radiação em monocultivo. Tal fato não ocorreu no cultivo de outono, quando as condições meteorológicas foram satisfatórias ao desenvolvimento do feijoeiro.

Conclusões

As frações medidas de irradiância (I_r/I_0) disponíveis aos feijoeiros e as simuladas pelo modelo utilizado apresentaram boa aproximação entre os valores. Assim, o modelo simula adequadamente a radiação disponível à cultura intercalar em um SAF em renque.

A mensuração ou estimativa da irradiância relativa disponível, por estar direta e positivamente relacionada com a produção de fitomassa, pode ser utilizada na predição da fitomassa relativa do feijoeiro em sistemas agroflorestais.

O decréscimo na disponibilidade de radiação é o principal fator para a redução do crescimento dos feijoeiros mais próximos às árvores.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo apoio financeiro para a execução desta pesquisa.

Referências bibliográficas

BERNARDES, M.S. et al. Tree-crop interactions in agroforestry system of rubber with soybean and maize. In: 5th CONGRESS OF EUROPEAN SOCIETY FOR AGRONOMY. **Short Communications**. Slovak Republic, 1998. vol II, p.125-126.

BERNARDES, M.S.; CASTRO, P.R.C.; MARTINS, A.N. **Formação da copa e resistência de árvores ao vento: modelo de seringueira**. Piracicaba: FEALQ, 1996. 88 p.

BERNARDES, M.S. **Simulation of agroforestry systems: the case of rubber tree associated with other crops**. Wageningen-Holanda: 1993. 63 p. (Programa de doutorado) - Wageningen Agricultural University. 1993.

BURGA, C.A. **Canopy architecture, light distribution, and photosynthesis of different dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plant types**. 1978. 1v. Tese (Ph.D.). - Michigan State University, East Lansing. EUA. 1978.

EMBRAPA - CNPS **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 1 v.

FANCELLI, A.L. A seringueira consorciada a culturas anuais e perenes. In: SIMPÓSIO DA CULTURA DA SERINGUEIRA, 2°. Piracicaba, 1987. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 1990. p.205-22.

FANCELLI, A.L.; CÂMARA, G.M.S.; TOLEDO, F.F. Influência da utilização de culturas intercalares em seringais em formação no Estado de São Paulo. In: SEMINÁRIO NACIONAL DA SERINGUEIRA 4. Salvador, 1984. **Resumos...** Salvador: SUDHEVA/EMBRAPA, 1984, p.79.

GEPTS, P. & FERNÁNDEZ, F. **Etapas de desarrollo de la planta de frijol comum (*Phaseolus vulgaris* L.)** Cali, Colombia: CIAT, 1982. 10 p.

GOUDRIAAN, J. **Crop micrometeorology: a simulation study**. Wageningen: PUDOC, 1977. 249 p. (Simulation Monographs).

GARDINER, T.R.; VIETOR, D.M.; CRAKER, L.E. Growth habit and row width effects on leaf area development and light interception of field beans. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 59, p. 191-199, 1979.

HOPKINS, W.G., **Introduction to plant physiology**, 1° ed., Nova York: John Willey & Sons Inc., 1995. 464 p.

NAIR, P.K.R. **Soil productivity aspects of agroforestry**. Nairobi: International Centre for Research in Agroforestry. 1984. 85 p. (Science and Practice of Agroforestry, 1).

ONG C. K., CORLETT J. E., MARSHALL F. M., BLACK, C. R. Principles of resource capture and utilization of light and water. In: ONG C. K. & HUXLEY P. (Eds.) **Tree-crop interactions, a physiological approach**. Wallingford-Inglaterra: CAB International, 1996. Cap. 4, p. 73-158.

PINTO, L.F.G.; BERNARDES, M.S.; STAPE, J.L.; PEREIRA, A.R. Growth, yield and system performance simulation of a sugarcane-eucalyptus interface in a sub-tropical region of Brazil. **Agriculture Ecosystems & Environment**. v. 105, p. 77-86, 2005.

RIGHI, C.A. Interações ecofisiológicas acima e abaixo do solo em um sistema agroflorestral de seringueira (*Hevea brasiliensis*) e feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*). Piracicaba, 2000. 130p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2000.

RIGHI, C.A. et al. Fenologia e variação temporal do índice de área foliar de três cultivares de seringueira (*Hevea spp.*) **Agrotropica**, v. 13, n. 3, p. 125-132. 2003.

RIGHI, C.A. & BERNARDES, M.S. Modelo de atenuação de radiação para sistema agroflorestral de seringueira (*Hevea brasiliensis*) e feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*). In: CONGRESSO. BRASILEIRO FISILOGIA VEGETAL, VII., julho/1999, Brasília-DF, **Resumos... - Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 11, p. 56. 1999. (Suplemento).

SENTELHAS, P.C. et al. **Análise dos dados climáticos e do balanço hídrico climatológico de Piracicaba (1917-1997)**. Piracicaba: ESALQ, DFM, 1998. 81 p.

VILLA NOVA, N.A. & SENTELHAS, P.C. Evapotranspiração máxima do feijoeiro, cv. Goiano precoce, em função do índice de área foliar e da evapotranspiração do tanque Classe A. In: REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, II, 1999 - **Anais...** v. 1, p. 212-18, 1999.

WESSEL, M. **The crop system in humid tropics**. Wageningen: Wageningen Agricultural University - Department of Tropical Crop Science, 1990. 20 p.

WHITE, J.W. & IZQUIERDO, J. **Frijol: Fisiología del potencial del rendimiento y la tolerancia al estrés**. Santiago/Chile: Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. 1989. 91 p.

WILLEY, R. W. & REDDY, M. S. A field technique for separating above-ground and below-ground interactions in intercropping - an experiment with pearl millet groundnut. **Experimental Agriculture**. v. 17, n. 3, p. 257-264, 1981.

YOUNG, A. **Agroforestry for soil conservation**. Wallingford-Inglaterra: CAB International, 1989. 276p.

ZHU, Z. et al. **Agroforestry systems in China**. Canadá: International Development Centre - The Chinese Academy of Forestry, 1981. 216 p.