

Dinâmica da água em sistemas agroflorestais



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

Documentos 102

Dinâmica da água em sistemas agroflorestais

Maria Luiza Franceschi Nicodemo

Embrapa Pecuária Sudeste
São Carlos, SP
2011

Embrapa Pecuária Sudeste

Rod. Washington Luiz, km 234
13560 970, São Carlos, SP
Caixa Postal 339
Fone: (16) 3411- 5600
Fax: (16): 3361-5754
Home page: www.cppse.embrapa.br
Endereço eletrônico: sac@cppse.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Ana Rita de Araujo Nogueira
Secretária-Executiva: Simone Cristina Méo Niciura
Membros: Ane Lisye F.G. Silvestre, Maria Cristina Campanelli Brito,
Milena Ambrosio Telles, Sônia Borges de Alencar

Normalização bibliográfica: Sônia Borges de Alencar
Editoração eletrônica: Maria Cristina Campanelli Brito
Foto da capa:

1ª edição

1ª edição on-line (2011)

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 Pecuária Sudeste

Nicodemo, Maria Luiza Franceschi

Dinâmica da água em sistemas agroflorestais [Recurso eletrônico] / Maria Luiza Franceschi Nicodemo. — Dados eletrônicos. — São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2011.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: Word Wide Web: <<http://www.cppse.embrapa.br/sites/default/files/principal/publicacao/Documentos102.pdf>>

Título da página na Web (acesso em 30 novembro de 2011).

36p. (Documentos / Embrapa Pecuária Sudeste, 102; ISSN: 1980-6841).

1. Sistema agroflorestal – Água - Dinâmica. I.Título. II. Série.

CDD: 581.5222

Autores

Maria Luiza Franceschi Nicodemo

Zootecnista, Ph.D em Agricultura Pesquisadora da
Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP.
mlnicodemo@cppse.embrapa.br

Sumário

Introdução	7
Competição por água em SAFs	8
Balanco hídrico dos sistemas agroflorestais	11
Interceptação da água de chuva	13
Evaporação	15
Drenagem (infiltração) e escoamento superficial.....	17
Eficiência do uso da água pelas plantas	19
Distribuição das raízes de árvores no solo	23
Redistribuição de água no solo	27
Comentários finais	29
Referências	30

Dinâmica da água em sistemas agroflorestais

Maria Luiza Franceschi Nicodemo

Introdução

Sistemas agroflorestais (SAFs) são formas de uso da terra que envolvem deliberada retenção, introdução ou mistura de árvores ou outras plantas lenhosas nos campos de produção agrícola/animal (MACDICKEN e VERGARA, 1990, citado por DANIEL et al., 1999). Esses sistemas são conduzidos de modo a tirar proveito de interações ecológicas positivas, minimizando a competição. Deseja-se que o sistema seja mais eficiente na utilização dos recursos disponíveis – água, luz e nutrientes – que os plantios solteiros convencionais. A melhor oportunidade de complementaridade entre as árvores e a forrageira ocorre na existência de um recurso que limite o crescimento, de modo que outros recursos estejam subutilizados (CANNEL et al., 1996). Nesta revisão serão abordados aspectos do balanço de água em sistemas agroflorestais e mostradas situações de competição e de complementaridade do uso de recursos entre as plantas. Serão discutidas questões referentes ao desenvolvimento e à distribuição radicular e ao transporte de água das plantas, destacando o papel das árvores na regulação do microclima e seus possíveis efeitos na produção de biomassa do cultivo agrícola ou da pastagem associados. Neste texto, o termo “agricultura” refere-se ao conjunto de atividades agrícolas, pecuárias e florestais, compreendendo a produção de alimentos, fibras e energia.

Competição por água em SAFs

A competição por água entre as espécies que compõem o SAF pode limitar a produtividade de cultivos anuais. Rao et al. (1998) revisaram as interações biofísicas entre árvores, solo e cultivos agrícolas, concluindo que, em regiões de clima árido (até 350 mm chuva/ano) ou semiárido (até 500 a 700 mm chuva/ano), caracterizadas por precipitação pluvial baixa e irregular, a competição por água entre as árvores e o sub-bosque é muito severa e pode desestimular o uso de sistemas agroflorestais com alta densidade de árvores, como o cultivo em aléias ("alley cropping"). O cultivo em aléias é caracterizado pelo estabelecimento de espécies lenhosas - geralmente leguminosas - em linhas próximas, podadas de forma intensa, com culturas anuais plantadas entre elas. Os autores consideraram que embora houvesse melhoria na estrutura física do solo (maior agregação, menor densidade, menor resistência à penetração, maior porosidade e menor selamento superficial) pela integração do componente lenhoso ao cultivo agrícola, era improvável que esse incremento se refletisse em aumento da água disponível para os cultivos agrícolas em situações de estresse hídrico por causa da dominância das espécies lenhosas, o que levaria à menor produção agrícola. Neste trabalho, uma grande porcentagem de raízes finas de espécies lenhosas foi encontrada nos 50 cm mais superficiais do solo, onde as raízes de plantas agrícolas também se concentravam, indicando competição. Entretanto, deve-se ter em mente que a maior concentração de raízes não implica necessariamente em maior atividade, apenas indica a possibilidade da ocorrência de absorção (FERNANDEZ et al., 2008). Resultados análogos foram relatados por Kho (2000), Lott et al. (2003) e Ludwig et al. (2004), em ambientes com restrição de água.

Em uma revisão sobre os efeitos de árvores na dinâmica das pastagens na Nova Zelândia, Benavides et al. (2009) mencionaram estudos em que o solo sob as árvores era mais seco que os solos nas pastagens solteiras, atribuindo parte desse fenômeno ao maior consumo de água pelas plantas que compunham os sistemas. Também na Nova Zelândia,

Pollock et al. (2009) estudaram sistemas silvipastoris em uma região de precipitação pluvial média de 660 mm/ano, com secas no verão. Eles observaram que no período inicial de desenvolvimento (três a quatro estações de crescimento), as árvores (*Pinus radiata*) e as pastagens (alfafa ou *Lolium perene* + *Trifolium* spp.) exibiam relações de complementaridade, refletidas na umidade do solo e na distribuição das raízes. Entretanto, nas estações subseqüentes, as árvores passaram a competir com as forrageiras do sub-bosque por água no solo. Foi observada absorção de água a mais de 1,5 m de profundidade, tanto pelas raízes de forrageiras como das árvores. Intervenções ou alterações no sistema, como raleamento das árvores, podas, uso de forrageiras mais adaptadas e agressivas, e substituição dos pinheiros por árvores decíduas tolerantes à seca, foram sugeridas para permitir a manutenção da produtividade das pastagens. A menor disponibilidade de água nos sistemas arborizados pode advir também da perda por interceptação de água pela copa das árvores, como destacaram Douglas et al. (2006).

A situação pode ser diferente em locais com maior abundância de água. Em regiões subúmidas (com precipitação anual entre 500 mm/ano e 1.000 a 1.500 mm/ano), a competição por água entre árvores e cultivos associados é menos severa, podendo mesmo desaparecer no trópico úmido (região entre o Equador e o Trópico de Capricórnio). Ainda assim, no Brasil, Ribaski (s/d) também relatou menor quantidade de água no solo próximo às árvores, em uma avaliação durante o mês de dezembro, em uma associação de eucalipto (*Corymbia citriodora*) de 11 anos com a braquiária (*Brachiaria brizantha*) no noroeste do Paraná, ou seja: 12,7% de umidade a 3 m das árvores (produção de matéria seca de 2,5 t/ha), 15,8% de umidade a 15 m das árvores (produção de matéria seca de 3,1 t/ha) e 16,1% de umidade na pastagem sem árvores (produção de matéria seca de 3,7 t/ha).

Dulormne et al. (2004) avaliaram durante 20 meses a umidade do solo em sistema silvipastoril (*Gliricidia sepium* + *Dichanthium aristatum*) e em pastagem pura no trópico subúmido, com precipitação pluvial média

anual de 1.300 mm e estação seca de fevereiro a julho (com 30% das chuvas). A gliricídia foi mantida com altura máxima de 2 m e densidade de 12.000 plantas/ha. O material cortado das árvores e da pastagem era retirado do local para fornecimento aos animais. O teor de água no solo foi semelhante nas duas áreas durante a seca. Esses dados indicam que a gliricídia não competiu significativamente com a gramínea por água na estação seca, o que se refletiu em produção semelhante da gramínea ao sol e associada às árvores, ainda que a gliricídia, na época com 11 anos, tivesse sido plantada a partir de estacas e fosse podada frequentemente, ambos os processos indutores da formação de maior número de raízes superficiais, que poderiam aumentar a competição com a gramínea. Por outro lado, na estação chuvosa o teor de água no solo era menor na área com árvores, devido à demanda da associação de plantas ser maior. A presença das árvores modificou o microclima: reduziu a incidência de radiação fotossinteticamente ativa, que ficou entre 4,5 e 9,5 MJ/m² por dia para a pastagem solteira e entre 2,5 e 7,5 MJ/m² por dia no consórcio e não afetou a temperatura e a umidade relativa do ar na área. Os autores concluíram que o principal limitante para a produção da gramínea na estação seca foi a redução na luz incidente e não a competição por água.

É possível minimizar a competição por meio de correto planejamento e manejo de sistemas agroflorestais. Esses sistemas são dinâmicos e exigem intervenção para manter a produtividade desejada das plantas em associação. A Figura 1 mostra a complementaridade no uso de recursos pelas espécies A e B. A linha que liga A1 a B1 representa a produção total das espécies A e B, se cada espécie for cultivada solteira em diferentes proporções de uma determinada área. A curva pontilhada descrita por A + B representa o incremento de produção comparado à cultura solteira de uma possível combinação de A e B. À medida que o tempo passa, há uma sobreposição das necessidades e das estruturas físicas de A e B. Quando isso ocorre, as espécies vão competir por recursos, o que leva à queda da produção. Uma intervenção no tempo adequado (desbaste, poda de raízes, entre outras) controla a competição e permite que a produção das culturas combinadas volte a suplantá-la obtida com as culturas isoladas.

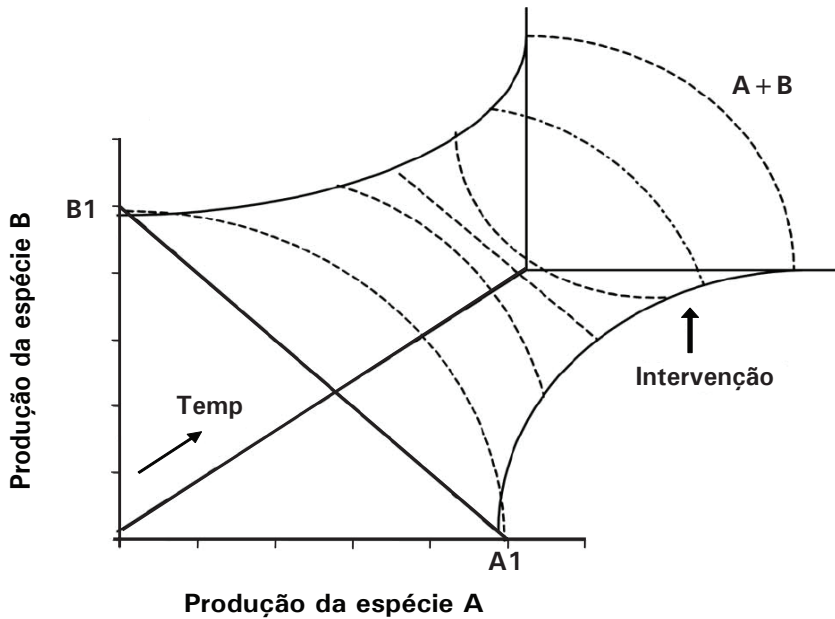


Figura 1. Necessidade de intervenção para reduzir a competição entre as espécies A e B. A1 e B1 representam o máximo potencial produtivo das espécies vegetais A e B em monocultura. A linha de A1 para B1 representa a produtividade proporcional das espécies A e B crescendo em consórcio. A curva pontilhada descrita por A+B representa a produtividade superior à das monoculturas, de uma combinação das espécies A e B. À medida que o tempo passa, estabelece-se competição entre as culturas, que pode ser controlada pelo manejo, possibilitando novo aumento da produtividade acima daquela obtida pelos plantios solteiros (Fonte: JOSE et al., 2004).

Balanço hídrico dos sistemas agroflorestais

A utilização da água proveniente da precipitação pluvial pelos componentes de sistemas agroflorestais varia em função das relações entre seus componentes. Ong & Swallow (2003) propuseram um modelo para estudar a eficiência de uso da água em SAFs que relaciona a transpiração, a interceptação pela copa, a evaporação, a drenagem, o escoamento superficial ("runoff") e o conteúdo de água no solo, tanto das árvores quanto dos cultivos associados, à precipitação pluvial (Figura 2).

Em sistemas silvipastoris, a água da chuva pode ser interceptada pelas copas das árvores ou cair sobre o solo. Na copa, parte da água pode evaporar e parte pode escorrer para o solo. Se a água cai no solo, pode evaporar ou se infiltrar no solo, de onde pode ser absorvida pela árvore e transpirada, ou pode se infiltrar no solo e, por drenagem, carregar o lençol freático; pode, ainda, ser perdida por escoamento superficial. A água da chuva pode também cair sobre a cultura agrícola ou a pastagem associada às árvores, onde passa pelos mesmos processos, mas com taxas diferentes para cada componente do balanço hídrico.

Assim,

$$\text{Precipitação pluvial (Pg)} = \text{Interceptação (I)} + \text{Transpiração (T)} + \text{Evaporação (E)} + \text{Escoamento Superficial (R)} + \text{Drenagem (D)} + \text{Teor de água no solo (\Theta)}$$

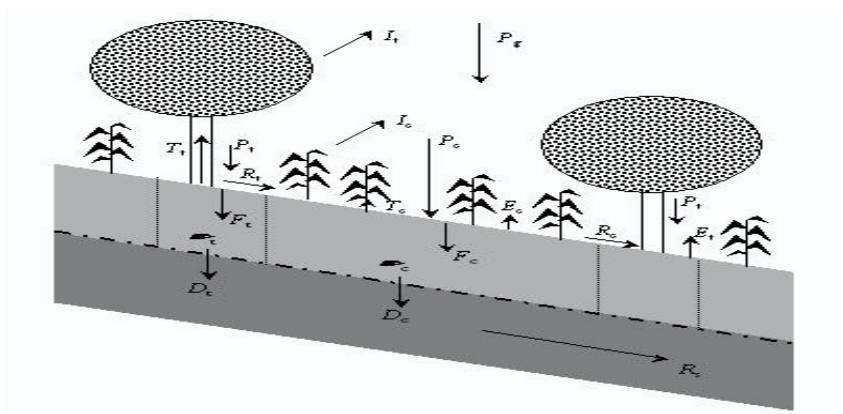


Figura 2. Balanço hídrico em sistema agroflorestal, em que precipitação pluvial (Pg); interceptação (I); transpiração (T); evaporação (E); escoamento superficial (R); drenagem (D); teor de água no solo (Θ) e infiltração (F). Os processos referem-se à cultura agrícola (c) e às árvores (t). Fonte: Ong & Swallow (2003).

Interceptação da água de chuva

A interceptação da água de chuva é afetada pela densidade de árvores e pela presença de pastagem ou cultivo agrícola. Pode haver variação significativa na cobertura do solo oferecida pelas culturas agrícolas, à medida que as plantas se desenvolvem. O índice de área foliar (IAF) é definido como o total de área foliar por área de superfície do terreno e está diretamente relacionado com a capacidade de interceptação da chuva pelo dossel. Lott et al. (1997, citados por JACKSON & WALLACE, 1999) relataram IAF variando de 0,2 aos 10 dias pós-emergência até o máximo de 1,8 na fase de florescimento do milho, aos 40 dias pós-emergência. Esta variação tem impacto também sobre a proteção do solo.

Os sistemas agroflorestais geralmente comportam uma densidade de árvores muito menor que as florestas naturais e isso afeta dois fatores-chave da interceptação de água das chuvas: a quantidade de água armazenada na copa e a taxa de evaporação de água da copa. A quantidade de água armazenada na copa por unidade de área de solo depende diretamente da área de cobertura do dossel, o que está ligado à densidade de plantas, e tende a zero à medida que diminui a área coberta (ONG & SWALLOW, 2003). Fatores como umidade da copa antes da chuva, intensidade e duração da chuva também podem causar grandes variações na interceptação de água pela copa (JETTEN, 1996).

As copas das árvores podem interceptar uma fração significativa e variável de água das chuvas, tanto em sistemas naturais (Tabela 1), quanto em sistemas agroflorestais.

Tabela 1. Porcentagem de interceptação da água de chuva pela copa das árvores.

Tipo de vegetação	Interceptação (%)
Florestas de coníferas	21-48*
Florestas decíduas	9,7-19,5*
Vegetação do semiárido/árido	13-18,5*; 40% (plantas isoladas)*
Florestas tropicais	7,2-50*; 16-17**

*Carlyle-Moses (2004); ** Jetten (1998).

Benavides et al. (2009) mencionam estudos com *Populus* na Nova Zelândia, onde a presença das árvores interceptou de 6 a 34% da quantidade de chuva que chegava ao sub-bosque. Paço et al. (2009) estudaram um ecossistema savânico mediterrâneo, com esparsa cobertura de carvalhos e extensiva participação de gramíneas. Observaram que as perdas por interceptação corresponderam a 27% da chuva por unidade projetada de copa.

A fração da água das chuvas que é interceptada pela copa tende a diminuir à medida que a precipitação pluvial aumenta de 400 para 1.000 mm, tanto em climas temperados quanto tropicais (ONG & SWALLOW, 2003). Esses autores estimaram que em um sistema agroflorestal com 50% de cobertura florestal, a perda de água das chuvas por interceptação seria muito maior nos trópicos úmidos (10 a 50%, dependendo da localização: se continental, nas montanhas ou costeira) do que em clima semiárido (10%). Espera-se maior perda por interceptação por florestas de altitude nos trópicos úmidos devido à transferência de energia dos oceanos próximos por movimentos horizontais de massa (advecção). A taxa de evaporação de água do dossel úmido depende principalmente das condições atmosféricas, mas se as árvores estão dispostas mais esparsamente, as trocas são mais eficientes, pois os ambientes são mais ventilados (ONG & SWALLOW, 2003).

Uma parte, ou a totalidade, da água retida na copa evapora antes de alcançar o solo (ONG & SWALLOW, 2003). Rutter (1975), citado por Paço et al. (2009), considera que a interceptação é importante porque, pelo menos em condições de clima temperado e sob iguais condições de clima - de radiação e de déficit de pressão de vapor - a taxa de evaporação da água interceptada na copa é muito maior que a taxa de transpiração pelas folhas, devido à menor resistência aerodinâmica. A resistência aerodinâmica representa a dificuldade com que a umidade que deixa a superfície das folhas (e do solo) é dispersa pelo meio. Na proximidade da vegetação o ar tende a ficar mais úmido, dificultando o fluxo de evaporação. A velocidade do vento e a turbulência contribuem para reduzir a resistência aerodinâmica, trocando o ar úmido próximo à

superfície que está fornecendo vapor, como as folhas das plantas ou as superfícies líquidas, pelo ar seco de níveis mais elevados da atmosfera. A resistência aerodinâmica é inversamente proporcional à altura dos obstáculos enfrentados pelo vento, porque são estes que geram a turbulência, e também inversamente proporcional à velocidade do vento (COLLISCHONN & TASSI, 2011). Na vegetação rasteira a resistência aerodinâmica é, geralmente, uma ordem de magnitude mais alta que nas matas, e a taxa de evaporação das folhas molhadas é semelhante à de transpiração. Dessa maneira, a evaporação da água de chuva interceptada representa uma perda, quando esta cai nas árvores, mas não quando cai na vegetação rasteira (RUTTER, 1975 citado por PAÇO et al., 2009).

Considerando que há recomendações para que se mantenha a cobertura do solo pelas árvores em sistemas silvipastoris no Brasil em torno de 20 a 25% (PORFIRIO DA SILVA, 2006), pode-se esperar que uma fração relativamente pequena da água das chuvas seja interceptada pela copa das árvores.

Evaporação

Nos trópicos, grande quantidade de água pode ser perdida da superfície do solo por evaporação, principalmente em regiões com alta precipitação pluvial, alta incidência de radiação solar e cobertura do solo esparsa. A redução da evaporação direta da água do solo pode aumentar a eficiência de uso da água nos sistemas de produção (WALLACE, 2000), e é considerada especialmente importante em situações de baixa precipitação pluvial (< 700 mm/ano) (ONG & SWALLOW, 2003).

Jackson & Wallace (1999), estudando a evaporação do solo nos trópicos, observaram que a evaporação variou com a cobertura do solo. A evaporação no solo descoberto foi comparada com as evaporações do solo em cultivo solteiro de milho com 1 m entre linhas, em cultivo

de grevilea (*Grevillea robusta*) com espaçamento de 3 m x 4 m e em consórcio de milho + grevilea, onde o milho foi plantado entre as linhas de grevilea. Lisímetros foram instalados sob o milho, ou entre linhas de milho, e a 0,3 m ou 2,5 m da base das árvores, para avaliar o efeito da proximidade das plantas na evaporação da água do solo. Quando se considerou toda a estação chuvosa, as árvores em plantio solteiro reduziram a evaporação do solo em até 24%, enquanto a cultura do milho só reduziu 8% da evaporação do solo, por ser uma cultura de ciclo curto. A presença da cultura de milho solteiro reduziu a evaporação em 40%, no final do ciclo da cultura, apenas quando o IAF aumentou. Durante a maior parte do tempo a capacidade de cobertura do solo pelo milho foi baixa. A evaporação foi de 82% da evaporação do solo descoberto a 0,3 m das árvores e de apenas 95% a 2,5 m, mas essa diferença foi perdida com a poda severa das árvores. A proteção do solo varia, dependendo do manejo adotado no SAF. Neste estudo, o pequeno desenvolvimento da copa das árvores, à qual foram impostas podas, associado ao menor desenvolvimento do milho comparado ao cultivo solteiro, não propiciou a melhor proteção do solo entre os cultivos comparados.

Por outro lado, Lin (2010), ao estudar o efeito do sombreamento em cafezais em Chiapas no México, mostrou que com 60 a 80% de cobertura as taxas de evaporação diárias do solo reduziram em até 40% em comparação ao sombreamento de apenas 10 a 30%. Na estação seca, foram mantidos altos níveis de umidade do solo até mesmo com 30 a 65% de sombra.

A quantidade de água que evapora do solo depende da carga radiante e das características hidráulicas do solo (ONG & SWALLOW, 2003). Solos com maior capacidade de retenção de água estão sujeitos a liberarem maior quantidade de água retida para a atmosfera sob uma determinada carga radiativa incidente. Dessa forma, o efeito do sombreamento na retenção de água é maior em solos com mais água. Wallace et al. (1999) observaram que a redução da evaporação por sombreamento do solo foi maior em solo com maior teor de silte

do Quênia que em solo arenoso da Nigéria, a uma mesma taxa de cobertura (IAF de 2,5) e atribuíram esse efeito à maior quantidade de água retida no solo queniano que estava sujeita aos efeitos da energia radiante incidente. Da mesma forma, Aguiar (2008) relatou menores alterações nas características físicas do solo, incluindo retenção de água, em SAF no semiárido cearense, do que em SAF na Zona da Mata mineira, comparados ao cultivo tradicional a pleno sol. O autor considerou que esses resultados, pelo menos em parte, eram devidos à menor estruturação do argissolo arenoso cearense.

Drenagem (infiltração) e escoamento superficial

Parte da água de chuva que atinge o solo infiltra-se, e o volume que excede a taxa de infiltração começa a se acumular na superfície do solo, até alcançar um limiar, quando é perdido por escoamento superficial (ONG & SWALLOW, 2003). A taxa de infiltração depende de características do solo, da intensidade da chuva, da declividade do terreno e da rugosidade (presença de obstáculos que favorecem o acúmulo de água). Em locais onde o plantio integrado de espécies altera essas características, a infiltração e o escoamento superficial podem ser alterados.

O escoamento superficial pode ser reduzido pelo aumento da superfície de armazenamento da água e/ou pelo aumento da taxa de infiltração, o que pode ser conseguido por mudanças mecânicas na superfície do solo e pela adição de material à superfície. Técnicas de manejo que favorecem a manutenção de resíduos sobre o solo ou o uso de faixas de contorno (como no cultivo em aléias) reduzem o escoamento superficial (WALLACE, 2000).

As características físicas do solo podem ser alteradas favoravelmente após alguns anos de implantação de SAF. As raízes descompactam o solo, e ao morrer, deixam espaços que aumentam a porosidade, contribuindo para aumentar a capacidade de infiltração da água no solo (SANCHEZ et al., 1997). O maior teor de matéria orgânica e a

maior atividade biológica no solo dos SAFs levam à menor densidade aparente, maior porosidade, menor resistência à penetração e maior estabilidade dos agregados, se comparados aos sistemas de plantio convencionais (CARVALHO et al., 2004; AGUIAR, 2008). Em adição à melhoria nas características físicas do solo, Aguiar (2008) relatou aumento na retenção de água na faixa disponível para a planta, e no intervalo hídrico ótimo em SAF na Zona da Mata mineira, comparado ao cultivo a pleno sol.

A combinação da maior disponibilidade de nutrientes e microclima mais favorável (temperatura e umidade) nos SAFs faz com que haja aumento da vida associada ao solo. A maior presença de bactérias e invertebrados melhora a agregação do solo, aumenta a disponibilidade de fósforo, acelera a ciclagem de nutrientes, entre outros benefícios (SANCHEZ et al., 1997; VARGAS & HUNGRIA, 1997; RAO et al., 1998). Essas características têm reflexos na redução da erosão e na maior disponibilidade da água no solo.

As reduções por perdas de água por drenagem dependem do desenvolvimento radicular. Espécies perenes como arbustos e árvores tem geralmente raízes mais profundas que as culturas anuais e podem ser muito mais eficientes em utilizar a água disponível no solo, reduzindo a drenagem. Como as árvores podem utilizar a água fora da zona de exploração das plantas anuais e fora do período agrícola (no caso das regiões semiáridas com período de plantio bem definido), elas podem aumentar a eficiência de uso da água, quando associadas aos cultivos anuais nos sistemas agroflorestais. Há, no entanto, necessidade de pesquisa para estudar combinações de árvores e cultivos compatíveis e que façam melhor uso da água disponível (WALLACE, 2000). Lott et al. (2003) mostraram que a grevilea (*Grevillea robusta*) foi capaz de utilizar parte da água das chuvas que era anteriormente perdida. A grevilea, tanto em cultivo solteiro como em sistemas agroflorestais, chegou a utilizar de 64 a 68% da precipitação anual, três a quatro anos após o plantio. Estimou-se que 25% da água transpirada pelas árvores, oriunda de chuvas fora de

época ou de utilização da água residual no solo, foram utilizadas na estação seca. Ludwig et al. (2004), trabalhando em savana africana com 650 mm de chuvas anuais e cobertura de árvores de 10 a 20%, mostraram que essa combinação permitiu melhor utilização da água do solo armazenada em maior profundidade.

Joffre & Rambal (1993) descreveram o balanço hídrico de pastos arborizados na península ibérica, as Dehesas, onde a precipitação pluvial varia de 600 a 800 mm/ano e a seca de verão tem duração de 130 dias. As Dehesas caracterizam-se por baixa densidade de árvores (40 a 50/ha) associadas ao estrato herbáceo. Embora o consumo de água pelas árvores possa ser elevado, observou-se maior disponibilidade e armazenamento de água pela redução da drenagem e do escoamento superficial, avaliado até 1,5 m de profundidade, sob as copas das árvores de carvalho (*Quercus* spp.) do que em pastagem sob o sol, de modo que é provável que o déficit hídrico seja mais severo para a pastagem crescendo em pleno sol do que sob a copa.

Eficiência do uso da água pelas plantas

Um sistema de produção é mais eficiente no uso da água de chuva quando minimiza as perdas por drenagem, evaporação e escoamento superficial, aumentando o volume de água disponível para as plantas. A eficiência do uso da água pela planta, normalmente, é definida como a relação entre a produção de biomassa, ou produto comercial, pela quantidade de água aplicada ou evapotranspirada.

O aumento da eficiência do uso da água pela planta pode ser obtido pela maior fixação de carbono, ou aumento da produção de biomassa, por unidade de água utilizada. Monteith (1986), citado por Wallace (2000), propôs uma equação relacionando a eficiência de uso da água (e_w) e a demanda atmosférica (d):

$e_w = k/d$, em que k representa as características da fisiologia de uma determinada espécie, sendo k dependente das reações bioquímicas que regem os processos fotossintéticos celulares.

O aumento de k pode ser obtido pela seleção de espécies vegetais (C3 ou C4) e por melhoramento genético. O produto $e_w \cdot d$ não varia muito dentro dos grupos C3 e C4. As espécies C4 tendem a tolerar melhor o estresse hídrico que plantas C3, embora isso não seja universal. Algodão e grão-de-bico são plantas C3 tolerantes à seca, e milho e sorgo são espécies C4 que apresentam cultivares sensíveis à seca (WALLACE, 2000; ONG & SWALLOW, 2003).

d representa o déficit de pressão de vapor, também denominado déficit hídrico da atmosfera, déficit de saturação ou demanda atmosférica, e descreve a quantidade de vapor d'água necessária para atingir a saturação do ar a uma dada temperatura: $d = e_{(Ta)}^* - e_a$, onde: $e_{(Ta)}^*$ = pressão de vapor de água necessária para a saturação do ar à temperatura T_a e e_a = pressão de vapor à temperatura T_a .

A demanda atmosférica está entre as principais variáveis ambientais que influenciam a resposta dos estômatos. O aumento da demanda atmosférica reduz a eficiência de uso da água pela planta. A produção de matéria seca por unidade de água transpirada cai por um fator de dois (2) à medida que a demanda atmosférica aumenta de 2 kPa, em climas úmidos, para 4 kPa, em regiões semiáridas (WALLACE, 2000).

O sombreamento induzido pelas árvores reduz d , afetando a condutância dos estômatos (BRENNER, 1996, citado por WALLACE, 2000). A presença das árvores pode alterar não só a incidência da radiação solar como a umidade e a temperatura próximas à copa (WALLACE, 2000; ONG & SWALLOW, 2003). Como regra geral, considera-se que essas mudanças no microclima reduzem a demanda evaporativa próxima das árvores e podem minimizar o estresse hídrico da gramínea, especialmente durante a estação seca (DULORMNE et al., 2004).

Corroborando essas afirmações, Lin (2010) relatou que as demandas atmosféricas sobre a cultura de café foram muito afetadas pelo sombreamento. As variáveis relacionadas ao microclima - luz, temperatura e déficit de pressão de vapor do ar - mostraram forte

correlação com a demanda evaporativa. O sombreamento igual ou superior a 30% levou a reduções de 32% na demanda evaporativa de transpiração do cafeeiro, quando comparado com locais com maior incidência de sol.

Se as plantas estão em estresse por deficiência hídrica, isto é, se a transpiração supera a capacidade de absorção de água do solo para reposição nas folhas, pode ocorrer o fechamento dos estômatos e cessação da fotossíntese, com consequente redução na produção de biomassa (PRIMAVESI et al., 2007). Ovalle & Avendano (1988), citados por Dulormne et al. (2004) e Belsky et al. (1993), consideraram a menor evapotranspiração como principal responsável pelo aumento na produção de biomassa de gramíneas crescendo sob as árvores comparadas a gramíneas solteiras no trópico subúmido, apesar da menor radiação disponível. Belsky et al. (1993) observaram que, em locais com 450 mm de precipitação média anual, a produtividade da camada herbácea do sub-bosque foi 95% maior que a céu aberto; em ambiente um pouco mais úmido (750 mm de precipitação anual), a produtividade foi 52% maior sob as acácias (*Acacia tortilis*) que a pleno sol (808 g/m² vs. 533 g/m²), mas apenas 18% maior sob baobás (*Adansonia digitata*, 569 g/m² vs. 483,5g/m²). A radiação solar foi reduzida em 45 a 65% e a temperatura do solo de 5 a 12°C sob as árvores das duas espécies. A diferença entre as produtividades sob as árvores foi atribuída principalmente às maiores concentrações de nitrogênio no solo e à redução da evapotranspiração, minimizando importantes limitações nessas áreas.

Menor estresse das plantas sob a copa das árvores foi descrito por Gyenge et al. (2002). Os pesquisadores estudaram o balanço de água na Patagônia, caracterizada pelo clima semiárido de verão seco e inverno chuvoso, durante o período de outubro a abril. Relataram redução da água de camadas mais profundas do solo, que associaram à absorção pelas raízes de *Pinus ponderosa*, que superavam 3 m de profundidade. De modo geral, as gramíneas (*Festuca* spp. e *Stipa* spp.), cujas raízes alcançavam apenas de 0,6 a 0,8 m (GYENGE

et al., 2003), tinham maior potencial de água na folha sob as árvores do que em pasto ao sol, exceto no período mais seco. Gyenge et al. (2003) relataram que os pinheiros mantiveram a taxa de transpiração constante durante todo o período seco, apesar de baixa disponibilidade de água no solo até 1,4 m de profundidade.

A competição entre as plantas por água pode ser amenizada pelo sombreamento. No Brasil, Menezes et al. (2002) observaram que a umidade do solo sob *Ziziphus joazeiro* não foi diferente da umidade encontrada em capim-buffel (*Cenchrus ciliaries*) a pleno sol durante toda a estação de crescimento, ao contrário do que foi observado para a algarobeira (*Prosopis juliflora*), que mostrou menor umidade sob a copa no início da estação de crescimento na região semiárida do Nordeste (740 mm precipitação anual). As temperaturas do solo e do ar foram, respectivamente, 15,6 e 2,8°C menores sob *Z. joazeiro*, o que foi atribuído à estrutura da copa, que permitiu a interceptação de 65 a 70% da luz incidente entre 10 horas da manhã e 2 horas da tarde, enquanto *P. juliflora* interceptou somente de 20 a 30% da luz no mesmo período, com pouco efeito sobre a temperatura.

A contribuição de árvores com raízes profundas para aumento da umidade do ar é indiscutível, mas pode ser insuficiente para manter a produção da cultura associada. Paço et al. (2009) relataram que, em área de “Montados” em Portugal, com precipitação anual de 669 mm e verão seco, a transpiração da pastagem cessou quando o solo secou no verão, mas as árvores mantiveram a transpiração devido ao acesso das raízes à água de maiores profundidades do solo. “Montados”, assim como as “Dehesas” na Espanha, são áreas savânicas da Península Ibérica com árvores esparsas associadas a gramíneas. A transpiração das árvores representou mais da metade da transpiração do ecossistema, ainda que estas estivessem presentes em baixa densidade (30 árvores/ha, proporcionando 21% de cobertura do solo). O padrão de transpiração do pasto acompanhou a disponibilidade de água na camada mais superficial do solo, ficando próximo a zero na seca do verão (julho-outubro).

Tournebize (1994), citado por Dulormne et al. (2004), encontrou transpiração 15 a 20% menor em gramíneas plantadas com linhas de gliricídia (*Gliricidia sepium*) comparadas a gramíneas a pleno sol, relatando que a transpiração do sistema silvipastoril como um todo foi de 2 a 2,5 vezes maior que na pastagem pura. O autor cita alterações do microclima, que incluíram maiores temperatura e umidade do ar sob as árvores comparado à área sem árvores.

Em SAFs, o efeito da melhoria no microclima só se reflete em maior produção de biomassa se houver luz suficiente para o desenvolvimento adequado do sub-bosque e se houver água no solo capaz de atender às necessidades das árvores e das culturas associadas. Neste caso, as plantas C3 geralmente têm vantagens, pois já se encontram em saturação de luz em pleno sol (ONG & SWALLOW, 2003).

Distribuição das raízes de árvores no solo

Uma hipótese normalmente aceita, referente a sistemas agroflorestais, é de que os sistemas radiculares das plantas componentes ocupam estratos do solo diferentes quando estão associadas, levando ao uso complementar dos recursos (FERNANDEZ et al., 2008). Se as árvores forem capazes de assegurar o suprimento de um fator que limita o desenvolvimento das culturas associadas, a produção de biomassa por unidade de área pode aumentar.

O solo resseca primeiro na superfície, de modo que, plantas com a capacidade de acessar camadas mais profundas podem ter mais vantagens quando a água é limitante. Nos cerrados, por exemplo, Bucci et al. (2008) relataram que a umidade do solo varia muito na camada de 0 a 100 cm, e é estável ao longo do ano abaixo de 2 m de profundidade. De modo geral, considera-se que as árvores possuem sistemas radiculares mais profundos que as plantas anuais, e as gramíneas situam-se em uma faixa intermediária (SCHENK & JACKSON, 2005). O crescimento radicular em profundidade

de gramíneas pode ser limitado pelos solos ácidos e com elevada saturação de alumínio, que são características relativamente comuns no Brasil (ANDRADE et al., 2001).

Para que a competição por água entre as espécies arbóreas e as culturas anuais seja minimizada é importante que as raízes das árvores tenham acesso à água retida em profundidade. Smith et al. (1997) verificaram que, quando as árvores de nim (*Azadirachta indica*) em um SAF tinham acesso ao lençol freático (6 a 8 m de profundidade), estas recorreram a esse reservatório durante a estação seca, enquanto o milheto (*Pennisetum glaucum*) plantado próximo utilizou a água de camadas mais superficiais do solo. Por outro lado, em uma situação em que o lençol freático estava a 35 m de profundidade, as árvores e o milheto utilizaram a água nas camadas de solo de até 2 a 3 m durante todo o ano.

Tanto a atividade das raízes em profundidade como sua distribuição lateral podem afetar o balanço hídrico das plantas e o uso dos recursos disponíveis (água e nutrientes). A exploração horizontal do solo pelas plantas é menos estudada, mas pode ter consequências práticas para os sistemas agroflorestais. Sternberg et al. (2004) relataram que espécies florestais do cerrado eram capazes de absorver água até distâncias de 9 a 12 m da planta, enquanto nas áreas de mata, as distâncias exploradas pelas árvores eram menores (de 3 a 6 m da planta). Os autores sugerem que o extenso desenvolvimento de raízes laterais em áreas de cerrado se justifica pela maior necessidade de explorar o solo pobre em nutrientes. Essa distribuição das raízes pode representar vantagem competitiva para as árvores, que exploram um grande volume de solo em busca de recursos.

Lott et al. (1996), medindo fluxo de seiva pelas raízes laterais, indicaram que grevileas (*Grevillea robusta*) podem absorver água a 1,9 m de distância do tronco, aumentando a concorrência com outras culturas. Neste trabalho foi observado que a produtividade do milho foi reduzida a até 2 m de distancia das árvores nos períodos de precipitação pluvial média ou abaixo da média, em região de clima semiárido africano.

Desta forma, o estudo do impacto das árvores no desenvolvimento das gramíneas durante o ciclo anual de produção é importante para identificar as limitações à produção nos sistemas integrados. Associações de braquiária e eucalipto são muito comuns em sistemas silvipastoris da região Sudeste. Há também interesse na utilização de espécies florestais nativas, não só visando à composição de áreas de proteção ambiental, mas também como componentes de sistemas de produção (CARPANEZZI et al., 2010). Conhecendo-se a distribuição das raízes dessas plantas, é possível prever se a competição por água e por nutrientes na estação seca pode ser contornada, por explorarem extratos diferentes do solo.

Santos et al. (2007) avaliaram a distribuição de raízes de *Brachiaria* spp. de pastagens de diferentes idades, encontrando 65% da massa de raízes até 30 cm de profundidade e cerca de 8% entre 80 e 100 cm, em latossolo vermelho escuro de cerrado, caracterizando enraizamento predominantemente superficial. O eucalipto tem raiz central bem definida e desenvolvida, que penetra verticalmente no solo, sendo assim indicado para associação com a gramínea. Caso seja cogitado o uso de espécies florestais nativas em associação à braquiária, Gonçalves & Mello (2005) consideram que espécies florestais pioneiras nativas da Mata Atlântica possuem geralmente raízes pivotantes com grande capacidade de aprofundamento no solo, de modo que seriam indicadas para consorciação com gramíneas. As espécies florestais secundárias tardias e clímax da Mata Atlântica exibem raízes mais ramificadas, que emergem do colo da árvore, aumentando a possibilidade de competição por água e nutrientes com as gramíneas associadas, e assim podem apresentar algumas restrições à associação.

Há crescente adoção de clones em sistemas silvipastoris no Brasil, sem que estudos embasem melhor sua recomendação para esses sistemas. Uma questão já levantada, em relação à escolha das árvores para compor sistemas silvipastoris, é de que clones de eucalipto, com raízes fasciculadas e mais superficiais, competiriam mais com as culturas associadas do que eucaliptos oriundos de sementes, de raiz

pivotante. Entretanto, Pollock et al. (2009) não encontraram efeito do tipo de *Pinus radiata* (originado de clone ou de semente) utilizado em sistemas silvipastoris sobre a umidade do solo. Gonçalves & Mello (2005) mencionam estudo em que um clone superior de *E. urograndis* exibia melhor adaptação ao ambiente quando comparado com *E. grandis* oriundo de semente. Observou-se que, no verão, quando a demanda por água era muito alta, as árvores aumentavam a densidade de raízes finas em maior profundidade e apenas 30% das raízes finas eram encontradas até 30 cm, o que reduziria a competição com a cultura de verão. Já no inverno, com a redução do crescimento das árvores, a densidade de raízes finas nas camadas mais profundas se reduzia, com cerca de 70% das raízes sendo encontradas até 30 cm de profundidade. Nesse momento, a competição entre as plantas por água poderia ser exacerbada. Mulatya et al. (2002) compararam plantas de *Melia volkensii*, obtidas por sementes ou por estacas, e relataram maior proporção do enraizamento superficial, com grande expansão lateral, no plantio por estacas, resultando também em maior competição com o cultivo associado (milho) em região de clima seco (650-740 mm precipitação pluvial anual). Além da competição por água e por nutrientes, a resistência das plantas de eucalipto provenientes de clones a ventos fortes já foi questionada.

Para minimizar a competição com as culturas anuais e com a pastagem, pode ser indicado o uso de espécies florestais decíduas e semidecíduas nos sistemas agroflorestais. Nessas árvores, a superfície evaporativa é reduzida pela perda das folhas e, com isso, a demanda por água também se reduz. Uma alternativa ao uso de espécies decíduas ou semidecíduas é a poda de copa. A poda da copa pode controlar o sombreamento do cultivo associado e a quantidade e a época de maior absorção de água do solo pelas plantas lenhosas. Podas de copa frequentes na estação chuvosa, mas não na estação seca, permitiram à *Senna spectabilis* reduzir a transpiração, diminuindo a absorção de água do solo (NAMIREMBE et al., 2009). Além de reduzir a área foliar sujeita a trocas com a atmosfera, a poda induziu à formação de ramificação baixa, com vários troncos, de menor condutividade hidráulica. A árvore

podada sofre redução do calibre dos vasos de xilema e da área da seção transversal capaz de sustentar o transporte de seiva nos troncos, se comparada à árvore não podada (NAMIREMBE et al., 2009), o que reduz a transpiração e a demanda da árvore por água.

Redistribuição de água no solo

Não só a exploração dos recursos do solo, de modo geral, é mais completa, mas é possível que as árvores aumentem a disponibilidade de nutrientes e de água para os cultivos próximos. A redistribuição de água no solo ou “hidraulic lift” (HL) constitui uma forma de facilitação em que há movimentação de água para o solo mais seco através das raízes das plantas. A água trazida pelo HL pode ser utilizada tanto pela planta que foi responsável pelo processo como por plantas associadas a ela. Caldwell et al. (1998) comentaram que o HL pode contribuir de maneira significativa para a manutenção da evapotranspiração, e as plantas de raízes menos profundas (como gramíneas e culturas anuais) podem utilizar a água trazida para o solo mais superficial pelas plantas de raízes profundas como as árvores, com efeitos marcantes no balanço hídrico de ecossistemas.

Nesse sentido, Dawson (1993) observou que plantas crescendo próximas a *Acer saccharum* tinham maior crescimento aéreo que plantas a mais de 1,5 m a 2,5 m da base das árvores. A utilização de água redistribuída pelas plantas circundantes variou de 3% a 60%. O mecanismo envolvido nessa absorção desproporcional não é conhecido, mas pode envolver os padrões e a profundidade de enraizamento ou a habilidade da planta de produzir raízes rapidamente em resposta ao aparecimento de regiões úmidas do solo. Esse autor sugeriu que o menor estresse hídrico e as maiores taxas de condutância estomática traduzem-se em maior fixação de carbono e maior crescimento das plantas. Além disso, o maior umedecimento do solo trazido pela redistribuição de água pode auxiliar na mineralização de nutrientes do solo, na manutenção das atividades das raízes e das associações micorrízicas, melhorando a disponibilidade de nutrientes e de água.

Revisando a literatura recente, Goldstein et al. (2008) relataram a utilização da água redistribuída pelas árvores no cerrado brasileiro por plantas herbáceas. Os autores alertam para a existência de muitas espécies lenhosas, com raízes funcionais nas camadas superficiais e nas camadas mais profundas, que participam da redistribuição de água no solo. A água que chega pelas raízes profundas pode ser importante para manter a funcionalidade das raízes superficiais das árvores e arbustos durante o período seco, ainda que o volume de água disponibilizado para as plantas herbáceas possa ser muito pequeno. Da mesma forma, Moreira et al. (2003) observaram que a água marcada com deutério (água deuterada), disponibilizada via HL por árvores, podia ser encontrada em arbustos e árvores crescendo na vizinhança das plantas marcadas. Comentaram que, em condições de estresse hídrico rigoroso, mesmo a liberação de uma pequena quantidade de água no solo deve contribuir para manter a absorção de nutrientes, evitar a cavitação e assegurar a sobrevivência de hifas micorrízicas. Espeleta et al. (2004) relataram que as espécies de árvores e arbustos que apresentavam HL eram aquelas mais adaptadas a ambientes com restrição hídrica e que apresentavam maior sobrevivência de raízes finas em solo seco.

As plantas tendem a evitar excessiva competição de raízes por meio de segregação espacial. Como consequência, as plantas associadas desenvolvem sistemas radiculares estratificados verticalmente, o que conduz à complementaridade no uso dos recursos do solo (SCHROTH, 1999). Cultivos agrícolas muito competitivos como milho e sorgo, podem induzir o deslocamento das raízes de árvores para porções mais profundas do solo. Fernandez et al. (2008) mostraram que a associação de pinus e gramíneas, em clima semiárido temperado, apresentou essa complementaridade no uso de água do solo e que o pinus em SAF usava menor volume de água mais superficial que pinus em monocultura.

Lehmann et al. (1998) relataram que árvores (*Acacia saligna*) e cultura anual (*Sorghum bicolor*), plantadas em aléias, fizeram uso mais eficiente da água disponível do que quando as espécies foram plantadas solteiras. O plantio integrado resultou em separação espacial das raízes de árvores e da cultura agrícola. Observou-se que o sorgo tinha mais raízes próximas à superfície do solo e as árvores, mais raízes profundas no cultivo em aléias em comparação ao plantio solteiro. A consorciação resultou em uso mais eficiente da água do solo entre as linhas de árvores que os plantios solteiros, o que foi demonstrado pelo perfil de absorção de água: as árvores alcançavam maiores profundidades de absorção e começavam a retirar água mais cedo depois da irrigação que o sorgo, que utilizava melhor a água mais superficial do solo.

Comentários finais

A interação de fatores relacionados à dinâmica da água em sistemas agroflorestais é bastante complexa. A previsão das respostas ao manejo e aos arranjos utilizados depende não só de um maior número de estudos realizados nas condições de cultivo brasileiras, mas também da integração dessas informações em modelos matemáticos capazes de conciliar toda a gama de variáveis envolvidas.

Referências

- AGUIAR, M. A. de. **Qualidade Física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de plantas) - Universidade Federal de Viçosa.
- ANDRADE, C. M. S.; GARCIA, R.; COUTO, L.; GOMES, O. P. Fatores limitantes ao crescimento do capim-tanzânia em um sistema agrossilvipastoril com eucalipto, na região dos Cerrados de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, n. 49, p. 1178-1185, 2001.
- BELSKY, A. J.; MWONGA, S. M.; AMUNDSON, R. G.; DUXBURY, J. M.; ALI, A. R. Comparative effects of isolated trees on their undercanopy environments in high- and low-rainfall savannas. **Journal of Applied Ecology**, v. 30, p. 143-155, 1993.
- BENAVIDES, R.; DOUGLAS, G.B.; OSORO, K. Silvopastoralism in New Zealand: review of effects of evergreen and deciduous trees on pasture dynamics. **Agroforestry Systems**, v. 76, p. 327-350, 2009.
- BUCCI, S. J.; SCHOLZ, F. G.; GOLDSTEIN, G.; HOFFMANN, W. A.; MEINZER, F. C.; FRANCO, A. C.; GIAMBELLUCA, T.; MIRALLES-WILHELM, F. Controls on stand transpiration and soil water utilization along a tree density gradient in a Neotropical savanna. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 6-7, p. 839-849, 2008.
- CALDWELL, M. M., DAWSON, T. E.; RICHARDS, J. H. Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants. **Oecologia**, v. 113, n. 2, p. 151-161, 1998.
- CANNELL, M.; VAN NOORDWIJK, M.; ONG, C. K. The central agroforestry hypothesis: the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire." **Agroforestry Systems**, v. 34, n. 1, p. 27-31, 1996.

CARLYLE-MOSES, D. E. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. **Journal of Arid Environments**, v.58, n. 2, p. 181-202, 2004.

CARPANEZZI, A. A.; NEVES, E. J. M.; AGUIAR, A. V. de; SOUSA, V. A. Espécies lenhosas alternativas para fins econômicos no Paraná. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO FLORESTAL, 2.; SEMANA DE ESTUDOS FLORESTAIS, 11., 2010, Irati, **Palestra...** Irati: UNICENTRO, 2010. Disponível em: < <http://anais.unicentro.br/sef2010/pdf/palestras/Carpanezzi.pdf> >. Acesso em 10 nov. 2010.

CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 11, p. 1153-1155, 2004.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia**. Disponível em: http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/apostila_hidrologia/apostila.html. Acesso em: 03 jun. de 2011.

DANIEL, O.; COUTO, L.; VITORINO, A. C. T. Sistemas agroflorestais como alternativas sustentáveis à recuperação de pastagens degradadas. In: SIMPÓSIO – SUSTENTABILIDADE DA PECUÁRIA DE LEITE NO BRASIL, 1, 1999, Goiânia. **Anais...** Juíz de Fora: EMBRAPA-CNPGL, 1999. p.151-170.

DAWSON, T. E. Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. **Oecologia**, v. 95, n. 4, p. 565-574, 1993.

DOUGLAS, G.; WALCROFT, A.; HURST, S. E.; POTTER, J.F.; FOOTE, A. G.; FUNG, L. E.; EDWARDS, W. R. N.; VAN DEN DIJSSEL, C. et al. Interactions between Widely Spaced Young Poplars (*Populus* spp.) and the Understorey Environment. **Agroforestry Systems**, v. 67, n. 2, p. 177-186, 2006.

DULORMNE, M.; SIERRA, J. ; BONHOMME, R. ; CABIDOCHÉ, Y. M. Seasonal changes in tree-grass complementarity and competition for water in a subhumid tropical silvopastoral system. **European Journal of Agronomy**, v. 21, n. 3, p. 311-322, 2004.

ESPELETA, J. F.; WEST, J. B.; DONOVAN, L. A. Species-specific patterns of hydraulic lift in co-occurring adult trees and grasses in a sandhill community. **Oecologia**, v. 138, n. 3, p.341-349, 2004.

FERNÁNDEZ, M.; GYENGÉ, J.; DALLA SALDA, G. SCHLICHTER, T. M. Silvopastoral systems in Northwestern Patagonia II: water balance and water potential in a stand of *Pinus ponderosa* and native grassland. **Agroforestry Systems**, v. 55, n. 1, p. 47-55, 2002.

FERNÁNDEZ, M.; GYENGÉ, J.; LICATA, J.; SCHLICHTER, T. S.; BOND, B. J. et al. Belowground interactions for water between trees and grasses in a temperate semiarid agroforestry system. **Agroforestry Systems**, v. 74, n. 2, p. 185-197, 2008.

GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F. C.; BUCCI, S. J.; SCHOLZ, G.; FRANCO, A. C.; HOFFMANN, W. A. Water economy of Neotropical savanna trees: six paradigms revisited. **Tree Physiology**, v. 28, n. 3, p. 395-404, 2008.

GONÇALVES, J. L. DE M.; MELLO, S. L. DE M. O sistema radicular das árvores. In: GONÇALVES, J. L. DE M ; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2005. p. 219-267.

GYENGÉ, J. E.; FERNÁNDEZ, M. E.; SCHLICHTER, T. M. Water relations of ponderosa pines in Patagonia Argentina: implications for local water resources and individual growth. **Trees - Structure and Function**, v. 17, n. 5, p. 417-423, 2003.

JACKSON, N. A.; WALLACE, J. S. Soil evaporation measurements in an agroforestry system in Kenya. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 94, n. 3-4, p. 203-215, 1999.

JETTEN, V. G. Interception of tropical rain forest: performance of a canopy water balance model. **Hydrological Processes**, v. 10, p. 671-685, 1996.

JOFFRE, R.; RAMBAL, S. How tree cover influences the water balance of Mediterranean rangelands. **Ecology**, v. 74, p. 570-582, 1993.

JOSE, S.; GILLESPIE, A. R.; PALLARDY, S. G. Interspecific interactions in temperate agroforestry. **Agroforestry Systems**, v. 61-62, n. 1, p. 237-255, 2004.

KHO, R. M. A general tree-environment-crop interaction equation for predictive understanding of agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 80, n. 1-2, p. 87-100, 2000.

LEHMANN, J.; PETER, I.; STEGLICH, C.; GEBAUER, G.; HUWED, B.; ZECHA, W. Below-ground interactions in dryland agroforestry. **Forest Ecology and Management**, v. 111, p. 157-169, 1998.

LIN, B. B. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 4, p. 510-518, 2010.

LOTT, J. E.; KHAN, A. A. H.; ONG, C. K.; BLACK, C. R. Sap flow measurements of lateral tree roots in agroforestry systems. **Tree Physiology**, v. 16, n. 11-12, p. 995-1001, 1996.

LOTT, J. E.; KHAN, A. A. H.; BLACK, C. R.; ONG, C. K. Water use in a *Grevillea robusta*-maize overstorey agroforestry system in semi-arid Kenya. **Forest Ecology and Management**, v. 180, n. 1-3, p. 45-59, 2003.

LUDWIG, F.; DAWSON, T. E.; PRINS, H. H. T. et al. Belowground competition between trees and grasses may overwhelm the facilitative effects of hydraulic lift. **Ecology Letters**, v. 7, p. 623- 31, 2004.

MENEZES, R. S. C.; SALCEDO, I. H.; ELLIOTT, E. T. Microclimate and nutrient dynamics in a silvopastoral system of semiarid northeastern Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 56, n. 1, p. 27-38, 2002.

MOREIRA, M. Z; SCHOLZ, F. G; BUCCI, S. J.; STERNBERG, L. S.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F. C.; FRANCO, A. C. Hydraulic Lift in a Neotropical Savanna. **Functional Ecology**, v. 17, n. 5, p. 573-581, 2003.

MULATYA, J. M., WILSON, J.; ONG, C. K.; DEANS, J. D.; SPRENT, J. I. Root architecture of provenances, seedlings and cuttings of *Melia volkensii*: implications for crop yield in dryland agroforestry. **Agroforestry Systems**, v. 56, n. 1, p. 65-72, 2002.

NAMIREMBE, S.; BROOK, R.; ONG, C. Manipulating phenology and water relations in *Senna spectabilis* in a water limited environment in Kenya. **Agroforestry Systems**, v. 75, n. 3, p. 197-210, 2009.

ONG, C. K.; SWALLOW, B. M. Water productivity in forestry and agroforestry. In: KIJNE, J.W.; BARKER, R.; MOLDEN, D. (Ed.). **Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement**. Wallingford: CAB International, 2003. p. 217-228.

PAÇO, T. A.; DAVID, T. S.; HENRIQUES, M. O.; PEREIRA, J. S.; VALENTE, F.; BANZA, J.; PEREIRA, F. L.; PINTO, C.; DAVID, J. S. Evapotranspiration from a Mediterranean evergreen oak savannah: The role of trees and pasture. **Journal of Hydrology**, v. 369, n. 1-2, p. 98-106, 2009.

POLLOCK, K. M.; MEAD, D. J.; MCKENZIE, B. A. Soil moisture and water use by pastures and silvopastures in a sub-humid temperate climate in New Zealand. **Agroforestry Systems**, v. 75, p. 223-238, 2009.

PORFIRIO DA SILVA, V. **Arborização de Pastagens: I - Procedimentos para Introdução de Árvores em Pastagens Convencionais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2006. (Embrapa Florestas. Comunicado Técnico, 155).

PRIMAVESI, O.; ARZABE, C.; PEDREIRA, M. S. **Aquecimento global e mudanças climáticas: uma visão integrada tropical**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007. 213 p.

RAO, M.; NAIR, P.; ONG, C. Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 38, n. 1, p. 3-50, 1998.

RIBASKI, J. **Sistemas agroflorestais pecuários: algumas experiências desenvolvidas no Brasil**. [s/d]. Disponível em: <http://www.ciencialivre.pro.br/media/3f126a5cbc9ed337ffff81eafffd524.pdf>. Acesso em: 12 novembro de 2010.

SANCHEZ, P. A.; BURESH, R. J.; LEAKEY, R. R. B. Trees, soils, and food security. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 352, p. 949-961, 1997.

SANTOS, R. S. M de; OLIVEIRA, I. P. de; MORAIS, R. F. de; URQUIAGA, S. C.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Componentes da parte aérea e raízes de pastagens de *Brachiaria* spp. em diferentes idades após a reforma, como indicadores de produtividade em ambiente de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 2, p. 119-124, 2007.

SCHENK, H. J. ; JACKSON, R. B. Mapping the global distribution of deep roots in relation to climate and soil characteristics. **Geoderma**, v. 126, n. 1-2, p. 129-140, 2005.

SCHROTH, G. A review of belowground interactions in agroforestry, focussing on mechanisms and management options. **Agroforestry Systems**, v. 43, n. 1, p. 5-34, 1999.

SMITH, D. M.; JARVIS, P.G.; ODONGO, J. C. W. Sources of water used by trees and millet in Sahelian windbreak systems. **Journal of Hydrology**, v. 198, n. 1-4, p. 140-153, 1997.

STERNBERG , L. D. S. L.; BUCCI, S. ; FRANCO, A. Embrapa Florestas activity by neo-tropical savanna trees. **Plant Soil**, v. 270, p. 169–78, 2004.

VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. **Biologia dos Solos do Cerrado**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1997. 524 p.

WALLACE, J. S. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production." **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 82, n. 1-3, p. 105-119, 2000.

WALLACE, J. S.; JACKSON, N. A.; ONG, C. K. Modelling soil evaporation in an agroforestry system in Kenya. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 94, n. 3-4, p. 189-202, 1999.