



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

MARLETE MOREIRA DE SOUSA MENDES

**ECOFISIOLOGIA DE PLANTAS NATIVAS E CULTIVADAS E PARÂMETROS
FÍSICOS E QUÍMICOS DO AMBIENTE EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS NO
SEMIÁRIDO CEARENSE**

FORTALEZA-CE

2013

MARLETE MOREIRA DE SOUSA MENDES

**ECOFISIOLOGIA DE PLANTAS NATIVAS E CULTIVADAS E PARÂMETROS
FÍSICOS E QUÍMICOS DO AMBIENTE EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS NO
SEMIÁRIDO CEARENSE**

Tese submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais da Universidade Federal do Ceará, como requisito final para obtenção do grau de Doutor em Ecologia e Recursos Naturais.

Área de concentração: Conservação e Manejo dos Recursos Naturais..

Orientador: Prof. Dr. Teógenes Senna de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda

FORTALEZA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- M492e Mendes, Marlete Moreira de Sousa.
Ecofisiologia de plantas nativas e cultivadas e parâmetros físicos e químicos do ambiente em sistemas agroflorestais no semiárido cearense / Marlete Moreira de Sousa Mendes. – 2013.
157 f. : il., enc. ; 30 cm.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Biologia, Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Fortaleza, 2013.
Área de Concentração: Conservação e Manejo dos Recursos Naturais.
Orientação: Prof. Dr. Teógenes Senna de Oliveira.
Coorientação: Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda.
1. Ecofisiologia vegetal. 2. Fisiologia. I. Título.

MARLETE MOREIRA DE SOUSA MENDES

**ECOFISIOLOGIA DE PLANTAS NATIVAS E CULTIVADAS E PARÂMETROS
FÍSICOS E QUÍMICOS DO AMBIENTE EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS NO
SEMIÁRIDO CEARENSE**

Tese submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais da Universidade Federal do Ceará, como requisito final para obtenção do grau de Doutor em Ecologia e Recursos Naturais.

Aprovado em ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Teógenes Senna de Oliveira
Universidade Federal de Viçosa - UFV

Prof^a. Dra. Arlete Aparecida Soares
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Enéas Gomes Filho
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Marlos Alves Bezerra
Embrapa Agroindústria Tropical

Prof. Dr. Marcelo Zacharias Moreira
Universidade de São Paulo - USP

À Meyse Vitória, minha filha, minha maior motivação para a conclusão desse trabalho. Ao meu pai, Francisco Nunes, e ao meu esposo, Erik Ivanov, que sempre me apoiaram. Minha vitória também pertence a eles.

AGRADECIMENTOS

A Deus, porque me deu forças para realizar esse trabalho e porque abriu todas as portas necessárias para que chegássemos até aqui.

Ao meu orientador, professor Dr. Teógenes S. de Oliveira, por acreditar neste trabalho e por não medir esforços para a realização do mesmo.

Ao meu co-orientador, professor Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda, dentre outras coisas, por se aventurar nas coletas dos dados de trocas gasosas. Sua participação foi fundamental.

Às agências de fomento CAPES e CNPq, pelo auxílio financeiro que foi o suporte para o progresso desse trabalho.

À Embrapa Caprinos e Ovinos pelo espaço e instrumentos concedidos para a realização desta pesquisa, bem como ao Dr. João Ambrósio de Araújo Filho que planejou e implantou os sistemas agroflorestais experimentais utilizados nessa pesquisa.

Aos pesquisadores da Embrapa Caprinos e Ovinos, Dra. Ana Clara Rodrigues Cavalcante e Dr. Francisco Éden Paiva Fernandes, e aos técnicos, Gilberto Scheich (Giba) e José Airton Pereira, por todo apoio e provisões fornecidos durante as coletas de campo.

Àqueles que me ajudaram diretamente nas análises laboratoriais: Lilianne dos Santos Maia, Rafaela Batista Magalhães, Fátima Rego da Silva e Antonio José Duarte de Menezes. Ainda àqueles que de alguma forma me orientaram quanto à condução das análises: Isabel Cristina, Fred Acioly, Juliana Cavalcante, Daniela Zuliani, Robson Souza, José Augusto Sacramento e à Maria Georgia Oliveira.

A todos os companheiros do grupo de estudos SOMAR. Foi muito importante ouvir todos os conselhos depois das minhas apresentações e poder aprender com as apresentações deles.

Aos amigos que fiz no doutorado, com os quais sempre troquei informações e experiências, entre os quais: Janine Gadelha, Giovana Silva, Marcio Freitas, Marcos Leão, Marcelo Campelo, Djane Ventura, Adonai Cintra, Andréa Silveira, Déborah Praciano, Ramon Costa, Ivanilda Aguiar e Jamili Fialho.

Aos professores que transmitiram um pouco dos seus conhecimentos a mim durante essa jornada, entre eles: Rafael Oliveira, Arlete Aparecida, Ismail Soares, Boanerges Aquino, Sandra Santaella, Marcelo Moreira, Marlos Bezerra, Itayguara Ribeiro e Roberta Zandavalli.

Aos professores Dra. Francisca Soares (Tchesca) e Dr. Enéas Gomes por cederem alguns instrumentos (aparelhos) necessários à realização das pesquisas.

Ao técnico do Laboratório de Sementes João Batista Santiago, por todo auxílio na pesquisa sobre germinação, inclusive cedendo o espaço para montagem dos experimentos.

Aos meus familiares e amigos adventistas que sempre torceram por mim.

E, por fim, mas não menos importante, agradeço ao professor Dr. José Gerardo Oliveira que me incentivou a fazer a seleção do doutorado. Sem a motivação dele nada disso teria acontecido.

**“Um pouco de ciência nos afasta de
Deus. Muito, nos aproxima”.**

Louis Pasteur

RESUMO

Estudos têm mostrado que, quando há introdução de árvores no sistema de cultivo, as características ambientais são positivamente influenciadas e a produtividade do cultivo pode ou não ser positivamente impactada. Todavia, boa parte desses estudos enfoca ambientes com boas condições de umidade. O estudo comparativo entre sistemas agroflorestais e outras formas de uso da terra gera informações que unem produtividade e preservação ambiental, sobretudo em ecossistemas com baixa disponibilidade hídrica. O objetivo geral deste trabalho foi avaliar os efeitos do sistema agrossilvipastoril (AGP) sobre as propriedades químicas do solo e físicas do ambiente e sobre a fisiologia, desenvolvimento e teor de nutrientes de plantas cultivadas e nativas, tendo como referências áreas de sistema de cultivo tradicional (TR) e mata secundária (MS). A pesquisa foi desenvolvida em áreas experimentais pertencentes à Embrapa Caprinos e Ovinos, Sobral-CE, no período compreendido entre fevereiro e setembro de 2011. Foram avaliados parâmetros físicos do ambiente (umidade do ar e do solo, temperaturas do ar e do solo, radiação fotossinteticamente ativa, velocidade dos ventos e precipitação pluviométrica) registrados com auxílio de duas estações climatológicas instaladas no AGP e na MS, parâmetros químicos do solo (Nt, P disponível, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , pH, carbono orgânico, Fe, Zn, Cu e Mn), parâmetros ecofisiológicos do milho (*Zea mays*) e do pau-branco (*Cordia oncocalyx*) (área foliar específica, teor de clorofila, fotossíntese, transpiração, condutância estomática, eficiência no uso da água, potencial hídrico), além de diferenciar as zonas de captação de água pelas plantas através da análise de isótopos estáveis. Uma parte experimental também foi desenvolvida em casa de vegetação visando avaliar a ocorrência de competição por água entre o milho e o pau-branco desenvolvendo-se isoladamente ou em associação. O milho cultivado no AGP foi comparado com plantas cultivadas sob métodos tradicionais (após corte-e-queima da vegetação) e apresentou um maior desenvolvimento no AGP desde que não estivesse sob a copa do pau-branco, o que promovia competição, levando à redução nos processos fisiológicos e desenvolvimento do milho a 1 m, 2 m e 3 m de distância do caule do pau-branco (Capítulo 1). O experimento em casa de vegetação revelou que o milho tem seus parâmetros fisiológicos alterados tanto pela

associação quanto pelo nível de irrigação, com repercussões no desenvolvimento. Assim, a associação promove competição entre milho e pau-branco tanto a 100% quanto a 50% da capacidade de campo, todavia o milho é a espécie mais prejudicada (Capítulo 2). As árvores de pau-branco no AGP apresentaram maior resistência à seca que as plantas da MS, uma vez que elas foram capazes de manter as folhas verdes por mais tempo e manter maiores taxas de transpiração, condutância estomática e fotossíntese, além de maior conteúdo de água nas folhas apicais no período seco, quando o teor gravimétrico de água do solo foi menor no AGP que na MS (Capítulo 3). As análises de isótopos estáveis revelaram que o milho e o pau-branco no AGP captam preferencialmente a água do solo em profundidades superiores a 20 cm, o que pode ter levado à redução na umidade do solo entre 30-50 cm nesse sistema. Na MS o pau-branco obtém água de camadas mais superficiais do solo, até 30 cm de profundidade (Capítulo 4). A fotossíntese do pau-branco, no período seco, foi menos dependente de fatores ambientais no AGP do que na MS, sugerindo que as plantas do AGP desenvolveram estratégias que culminaram em maior assimilação líquida de carbono (Capítulo 5), com isso, as árvores do AGP apresentaram maior teor em alguns nutrientes, refletindo melhorias na qualidade química do solo (Capítulo 6). Diante desses resultados, entende-se que o AGP é um sistema adequado às condições semiáridas nordestinas, pois pode melhorar o desenvolvimento das árvores e do milho, desde que este não esteja sob sombreamento promovido pela copa das árvores, e do solo, apesar de algumas variáveis climatológicas serem mais extremas nesse sistema.

Palavras-chave: Competição. *Cordia oncocalyx*. Isótopos estáveis. Milho. Nutrição mineral. Sistema agrossilvipastoril. Trocas gasosas.

ABSTRACT

Studies show that when the trees are placed on culture systems, the environmental characteristics are positively influenced and productivity of the cultivation may or may not be positively impacted. However, most of these studies focused environments with good moisture conditions. The comparative study of agroforestry and other forms of land use generates information linking productivity and environmental preservation, especially in ecosystems with low water availability. The aim of this study was to evaluate the effects of the system agrosilvopastoral (AGP) on soil chemical and physical environment properties and on physiology, development and nutrient content of native and cultivated plants, taking as reference areas of traditional cultivation system (TR) and secondary forest (MS). The research was conducted at sites belonging to Embrapa Sheep and Goats, Sobral-CE, in the period between February and September 2011. We evaluated physical parameters of the environment (air humidity, soil moisture, soil and air temperatures, photosynthetically active radiation, wind speed and rainfall) recorded using two weather stations installed in the AGP and the MS, chemical parameters of the soil (Nt, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, pH, organic carbon, Fe, Zn, Cu and Mn), corn (*Zea mays*) and pau-branco (*Cordia oncocalyx*) ecophysiological (specific leaf area, chlorophyll content, photosynthesis, transpiration, stomatal conductance, water use efficiency, water potential), besides differentiate areas of water uptake by plants by stable isotope. An experiment was also developed in a greenhouse to evaluate the occurrence of competition for water between maize and pau-branco developing alone or in combination. Corn grown in AGP was compared with plants grown under traditional methods (after slash-and-burn vegetation) and presented a further development in the AGP if it was not under the canopy of pau-branco, which promoted competition, leading to a reduction in physiological processes and development of corn to 1 m, 2 m and 3 m away from the stem of pau-branco (Chapter 1). The experiment in the greenhouse showed that corn has its physiological parameters changed both by the association and by level of irrigation, with an impact on development. Thus, the association promotes competition between maize and pau-branco much as 100% to 50% of field capacity, however, corn is the most affected species (Chapter 2). The

pau-branco trees in AGP showed greater resistance to dry than MS plants, since they were able to maintain the green leaves longer and maintain higher transpiration rates, stomatal conductance and photosynthesis, and greater water content in the apical leaves in dry period, when the gravimetric water content of soil was lower in the AGP than the MS (Chapter 3). The stable isotopes analyzes revealed that corn and pau-branco in AGP system preferentially take up water from soil depths greater than 20 cm, which lead to a reduction in soil moisture at 30-50 cm depth. In MS pau-branco sources water from more superficial soil layers, up to 30 cm depth (Chapter 4). Photosynthesis in pau-branco, during the dry season, was less dependent on environmental factors in MS than in AGP, suggesting that plants in the AGP have developed strategies which resulted in higher net carbon assimilation (Chapter 5), with this, the trees in AGP showed a high level in some nutrients, reflecting the better quality soil chemistry of this system (Chapter 6). Given these results, it is understood that AGP is a system suitable conditions semiarid Northeastern, it may enhance the development of trees and maize, since this is not shaded by the canopy, and of the soil, although some climatic variables are more extreme in the system.

Keywords: Competition. *Cordia oncocalyx*. Stable isotopes. Maize. Mineral nutrition. Agrosilvopastoral system. Gas exchange.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figuras	Pág
1.1. Diagrama mostrando a localização das plantas de milho e do pau-branco (<i>C. oncocalyx</i>) em cada parcela.....	32
1.2. Radiação fotossinteticamente ativa, fotossíntese, condutância, transpiração e razão entre a concentração interna e externa de CO ₂ , aos 30 e 60 dias após o semeio, em plantas de milho cultivadas em sistema agrossilvipastoril a distâncias de um, dois, três e quatro metros do caule de <i>Cordia oncocalyx</i> Allemão e em sistema de cultivo tradicional.....	36
1.3. Teores de clorofila registrados aos 30 e 60 dias após o semeio em plantas de milho cultivadas em sistema agrossilvipastoril, a distâncias de um, dois, três e quatro metros do caule de <i>Cordia oncocalyx</i> Allemão e em sistema de cultivo tradicional.....	38
1.4. Potencial hídrico ao meio-dia, aos 60 dias após o semeio, em plantas de milho cultivadas em sistema agrossilvipastoril, a distâncias de um, dois, três e quatro metros do caule de <i>Cordia oncocalyx</i> Allemão e em sistema de cultivo tradicional, Fazenda Crioula, Sobral-CE	38
2.1. Condutância estomática, transpiração e fotossíntese em folhas de pau-branco (<i>Cordia oncocalyx</i>) e de milho (<i>Zea mays</i>), isolados e associados, sob dois níveis de umidade	52
2.2. Eficiência no uso da água de pau-branco (<i>Cordia oncocalyx</i>) e milho (<i>Zea mays</i>), isolados e associados, sob dois níveis de umidade.....	54
3.1. Map showing the experimental areas of National Research Center of Goats and Sheep, Crioula Farm, Sobral, Ceará, Brazil.....	65
3.2. Daily rainfall in areas of National Research Center of Goats and Sheep, at Crioula Farm, from February-September 2011.....	66
3.3. Gravimetric moisture in the soil in April and September, at four depths, in an agrosilvopastoral system and in the second forest	69
3.4. Water content in apical leaves of <i>Cordia oncocalyx</i> in an agrosilvopastoral system and in the second forest	69

3.5.	Photosynthesis, transpiration, conductance, and water use efficiency in basal leaves of <i>Cordia oncocalyx</i> in an agrosilvopastoral system and in second forest	71
3.6.	Photosynthesis, stomatal conductance, transpiration and water use efficiency in apical leaves of <i>Cordia oncocalyx</i> , at 7:00, 9:00, 12:00, and 15:00, in an agrosilvopastoral system and in second forest	72
3.7.	Leaf-to-air vapor pressure deficit in apical leaves of <i>Cordia oncocalyx</i> , at 7:00, 9:00, 12:00, and 15:00, in an agrosilvopastoral system and in the second forest	73
3.8.	SPAD index of chlorophyll content in basal and apical leaves of <i>Cordia oncocalyx</i> in an agrosilvopastoral system and in second forest	74
4.1.	Diagram showing the layout of maize plants and the <i>C. oncocalyx</i> tree in each plot.....	91
4.2.	Precipitation and volumetric soil moisture content during April and May 2011 in an agrosilvopastoral and secondary forest at Crioula Farm in Sobral, CE	94
4.3.	Precipitation and volumetric soil water content at 0-30 and 30-50 cm depths (Vw30 and Vw50, respectively) in an agrosilvopastoral system and secondary forest on April 25 th and May 19 th	96
4.4.	Stomatal conductance, transpiration and water use efficiency of <i>C. oncocalyx</i> on May 17 th in an agrosilvopastoral system and secondary forest	97
4.5.	Stomatal conductance, transpiration and water use efficiency in April for maize growing 1.0, 2.0, 3.0 and 4.0 meters away from the base of a <i>C. oncocalyx</i> tree in an agrosilvopastoral system	98
4.6.	Oxygen isotope ratios ($\delta^{18}\text{O}$) of <i>C. oncocalyx</i> xylem root sap and soil water at the 0-20, 20-40 and 40-60 cm depth increments under an agrosilvopastoral system and secondary forest	99
4.7.	Oxygen isotope ratios ($\delta^{18}\text{O}$) of water extracted from roots of maize growing 1.0, 2.0, 3.0 and 4.0 meters from the base of a <i>C. oncocalyx</i> tree, rainwater and of soil water from the 0-20, 20-40 and 40-60 cm depth increments in an agrosilvopastoral system in April and May	100

5.1.	Fotossíntese líquida em folhas apicais de pau-branco (<i>Cordia oncocalyx</i>), medidas entre 9 e 10h, em sistema agrossilvipastoril e mata secundária, Fazenda Crioula, Sobral-CE.....	121
5.2.	Fotossíntese líquida em folhas de <i>C. oncocalyx</i> em função da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação fotossinteticamente ativa, temperatura do solo a 5 cm de profundidade, umidade volumétrica do solo a 30 cm e 50 cm de profundidade em sistema agrossilvipastoril e em mata secundária nos meses chuvosos e secos.....	123
5.3.	Fotossíntese líquida em folhas de <i>C. oncocalyx</i> em função da radiação fotossinteticamente ativa, temperatura do solo a 5 cm de profundidade, umidade volumétrica do solo a 30 cm e 50 cm de profundidade em sistema agrossilvipastoril e em mata secundária nos meses chuvosos e secos	124
6.1	Teores de macro e micronutrientes em folhas apicais de pau-branco (<i>Cordia oncocalyx</i>), de março a setembro de 2011, em sistema agrossilvipastoril e mata secundária, Fazenda Crioula, Sobral-CE	144

LISTA DE TABELAS

Tabelas	Pág
1.1. Temperaturas do ar e das folhas de milho medidas das 12 às 13h, aos 30 e 60 dias após o semeio, em sistema agrossilvipastoril a distâncias de um, dois, três e quatro metros do caule de <i>Cordia oncocalyx</i> Allemão, comparadas ao sistema de cultivo tradicional	34
1.2. Altura, massa seca da parte aérea e da espiga de plantas de milho, aos 30, 60 e 90 dias após o semeio, em sistema agrossilvipastoril a distâncias de um, dois, três e quatro metros do caule de <i>Cordia oncocalyx</i> Allemão, comparadas ao sistema de cultivo tradicional	40
2.1. Designação dos tratamentos do pau-branco e do milho desenvolvendo-se em associação ou isoladamente sob 50% ou 100% da capacidade de campo	49
2.2. Massa seca total e área foliar do pau-branco (<i>Cordia oncocalyx</i>) e do milho (<i>Zea mays</i>), isolados e associados, em umidade do solo a 100% e a 50% da capacidade de campo	56
2.3. Área foliar específica, razão raiz/parte aérea e taxa de crescimento absoluto do pau-branco (<i>Cordia oncocalyx</i>) e do milho (<i>Zea mays</i> L.), isolados e associados, em umidade do solo a 100% e a 50% da capacidade de campo	57
3.1. Leaf temperature, photosynthetically active radiation, and leaf-to-air vapor pressure deficit of apical leaves of <i>Cordia oncocalyx</i> at 9:00 and of basal leaves at 12:00, in an agrosilvopastoral system and in the second forest in the rainy and dry seasons	70
3.2. Total fresh mass per tree, percentage of dry mass in samples, and total dry mass per tree of <i>Cordia oncocalyx</i> in the second forest and in an agrosilvopastoral system in July.....	74
5.1. Precipitação pluviométrica, temperatura média do ar, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos, radiação fotossinteticamente ativa, temperatura do solo a 5 cm de profundidade, umidade volumétrica do solo a 30 cm e 50 cm de profundidade em sistema agrossilvipastoril e mata secundária, entre os meses de janeiro e outubro de 2011,	

	Fazenda Crioula, Sobral-CE, Brasil.....	118
5.2.	Matriz de correlação entre as médias mensais das variáveis climatológicas e a fotossíntese líquida mensal em árvores de pau-branco (<i>Cordia oncocalyx</i>), em sistema agrossilvipastoril e mata secundária	122
6.1	Propriedades químicas de um Luvissole sob diferentes manejos, Fazenda Crioula, Sobral-CE.....	141
6.2	Teores de macro e micronutrientes em folhas de milho cultivado em sistema agrossilvipastoril, a 1 m, 2 m, 3 m e 4 m de distância do caule do pau-branco (<i>Cordia oncocalyx</i>), e em sistema de cultivo tradicional ...	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABREVIACÃO	SIGNIFICADO
AGP	Sistema agrossilvipastoril
ANOVA	Análise de variância
a.s.l	Ao nível do mar
COS	Carbono orgânico do solo
DAS	Dias após o semeio
DPV ou VPD	Déficit de pressão de vapor
IRGA	Analisador de gás infravermelho
MS ou SF	Mata secundária
PEPcase	Fosfoenolpiruvato carboxilase
RFA ou PAR	Radiação fotossinteticamente ativa
SAF	Sistema agroflorestal
SPAD	Análise de desenvolvimento de plantas e solo
TDM	Massa seca total
TFM	Massa fresca total
™	Trade Mark ou marca do produto
TR	Sistema de cultivo tradicional
var.	Variedade
Vv	Velocidade dos ventos

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
A	Fotossíntese
α	Alfa
Ca	Cálcio
C₃	Plantas com ciclo de fixação do carbono C ₃
C₄	Plantas com ciclo de fixação do carbono C ₄
C_i/C_{ar}	Razão entre o CO ₂ interno à folha e o do ar
CO₂	Gás carbônico
Cu	Cobre
E	Transpiração
Fe	Ferro
g	Gramas
gs	Condutância estomática
H	Hidrogênio
K	Potássio
kg	Quilograma
m	metro
Mil₁ ou M1	Milho plantado a 1 m de distância do caule de pau-branco
Mil₂ ou M2	Milho plantado a 2 m de distância do caule de pau-branco
Mil₃ ou M3	Milho plantado a 3 m de distância do caule de pau-branco
Mil₄ ou M4	Milho plantado a 4 m de distância do caule de pau-branco
mm	Milímetros
μmol	Micromol
mmol	Milimol
m² ou m⁻²	Metro quadrado
m³ ou m⁻³	Metro cúbico
Mg	Magnésio
mg kg⁻¹	Miligrama por quilograma
Mn	Manganês
N ou Nt	Nitrogênio total

Na	Sódio
O	Oxigênio
p	probabilidade
S	Sul
s⁻¹	Segundo
Zn	Zinco
W	Oeste
δ	Delta
%	Porcentagem
‰	Por mil
Ψ	Potencial hídrico
°C	Graus Celsius
<	Menor que
>	Maior que
=	Igual a

SUMÁRIO

	Pág
INTRODUÇÃO GERAL.....	22
CAPÍTULO 1 - DESENVOLVIMENTO DO MILHO SOB INFLUÊNCIA DE ÁRVORES DE PAU-BRANCO EM SISTEMA AGROFLORESTAL	27
1 INTRODUÇÃO	28
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4 CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS	40
CAPÍTULO 2 - FISILOGIA E DESENVOLVIMENTO DE DUAS ESPÉCIES ASSOCIADAS SOB DÉFICIT HÍDRICO	45
1 INTRODUÇÃO	46
2 MATERIAL E MÉTODOS	48
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4 CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS	58
CAPÍTULO 3 - ECOPHYSIOLOGY OF A WOODY PLANT IN AGROSILVOPASTORAL SYSTEM AND SECOND FOREST IN THE BRAZILIAN SEMIARID	62
1 INTRODUCTION	62
2 MATERIAL AND METHODS	64
2.1 <i>Study areas</i>	64
2.2 <i>Studied species</i>	66
2.3 <i>Water content in the soil plants</i>	66
2.4 <i>Physiological assessments</i>	67
2.5 <i>Dry mass production</i>	68
2.6 <i>Statistical analysis</i>	68
3 RESULTS	68
3.1 <i>Water content in the soil and plants</i>	68
3.2 <i>Leaf temperature, photosynthetically active radiation, and vapor pressure</i>	

<i>deficit</i>	69
3.3 <i>Gas exchange and water use efficiency in basal leaves</i>	70
3.4 <i>Daily gas exchanges and water use efficiency in apical leaves</i>	71
3.5 <i>Chlorophyll</i>	73
3.6 <i>Dry mass of Cordia oncocalyx</i>	74
4 DISCUSSION	75
REFERENCES	79
CAPÍTULO 4 - SOIL-PLANT WATER RELATIONS UNDER NATIVE AND CULTIVATED VEGETATION IN SEMIARID BRAZIL	87
1 INTRODUCTION	87
2 MATERIAL AND METHODS	89
2.1 <i>Study area</i>	89
2.2 <i>Studied species</i>	90
2.3 <i>Meteorological data</i>	91
2.4 <i>Physiological measurements</i>	91
2.5 <i>Cordia oncocalyx rooting depth</i>	92
2.6 <i>Isotope analysis</i>	92
2.7 <i>Statistical analysis</i>	93
3 RESULTS	93
4 DISCUSSION	100
5 CONCLUSIONS	103
REFERENCES	104
CAPÍTULO 5 - ALTERAÇÕES AMBIENTAIS E FISIOLÓGICAS EM <i>Cordia oncocalyx</i> EM SISTEMA AGROFLORESTAL NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	110
1 INTRODUÇÃO	112
2 MATERIAL E MÉTODOS	114
2.1 <i>Áreas de estudo</i>	114
2.2 <i>Variáveis climatológicas</i>	115
2.3 <i>Fotossíntese em Cordia oncocalyx</i>	115
2.4 <i>Análises estatísticas</i>	116
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	116

3.1 Variáveis climatológicas	116
3.2 Fotossíntese em <i>Cordia oncocalyx</i>	120
3.3 Relações entre variáveis climatológicas e fotossíntese	122
4 CONCLUSÕES	126
REFERÊNCIAS	126
CAPÍTULO 6 – TEORES DE NUTRIENTES NO SOLO E EM FOLHAS DE PLANTAS CULTIVADAS E NATIVAS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.....	132
1 INTRODUÇÃO	134
2 MATERIAL E MÉTODOS	136
2.1 Áreas de estudo	136
2.2 Espécies avaliadas e desenho experimental	137
2.3 Análises químicas do solo	138
2.4 Análises de nutrientes foliares	139
2.5 Análises estatísticas	139
3 RESULTADOS.....	140
3.1 Análises químicas do solo	140
3.2 Nutrientes foliares do pau-branco e do milho	142
4 DISCUSSÃO	145
4.1 Nutrientes do solo	145
4.2 Nutrientes em folhas de pau-branco	146
4.3 Nutrientes em folhas de milho	148
5 CONCLUSÕES	149
REFERÊNCIAS	150
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	154
REFERÊNCIAS GERAIS	155

INTRODUÇÃO GERAL

Sistemas agroflorestais (SAFs) são sistemas de uso da terra caracterizados pelo crescimento de diferentes espécies de plantas perenes arbóreas em associação com culturas (Rasul; Thapa, 2006). São uma forma potencial de uso sustentável da terra, que combina árvores e arbustos com culturas e/ou animais de forma a aumentar e diversificar a exploração agrícola e a produção florestal e, ao mesmo tempo, que conserve os recursos naturais. Os SAFs são um sistema de manejo intensivo do agroecossistema que otimiza os benefícios das interações biológicas criadas quando as árvores e/ou arbustos são deliberadamente combinados com as culturas e/ou pecuária (Molua, 2005).

Árvores e arbustos podem ser o componente facilitador na associação com culturas e sua importância é claramente visualizada em trabalhos que mostram as funções dos mesmos em sistemas agroflorestais, ao atuar na melhoria das condições ambientais locais e no desenvolvimento de outras espécies, influenciando a produtividade do sistema (Yang *et al.*, 2009).

A associação entre árvores e cultivos reduz os efeitos negativos de períodos de escassez hídrica, sobretudo se houver diferenciação de nichos entre ambos, evitando-se a competição. Em regiões semiáridas, a associação entre árvores/arbustos e cultivos tem um impacto potencial sobre a produtividade do cultivo, desde que não haja sobreposição na zona de captação de água (Kizito *et al.*, 2006). Lehmann *et al.* (1998) mostraram que havia separação espacial entre raízes de sorgo e de árvores, sendo que, no período seco, as raízes do sorgo ocupavam as camadas mais superficiais do solo e as árvores as mais profundas. Isso indica que, dependendo das espécies de árvores e cultivos que estejam coexistindo, haverá menos competição quanto à captação de água e de nutrientes.

As árvores também podem alterar significativamente as condições microclimáticas do sub-bosque, aumentando a disponibilidade de água, e o sombreamento reduz a temperatura média diurna quando comparado a monocultura de milho (Ong *et al.*, 2000). Contudo, convém ressaltar que os benefícios das árvores que são introduzidas em SAFs acontecem somente após estas estarem estabelecidas, pois no período inicial de desenvolvimento das mesmas é comum

acontecer competição com o cultivo (Lott *et al.*, 2000; Hirota *et al.*, 2004). Ao longo dos anos ocorre diferenciação de nichos e os benefícios das árvores tornam-se evidentes.

A elevada abundância e riqueza de espécies que vivem juntas em florestas tropicais permitem um elevado potencial de competição ou partição dos recursos hídricos durante a estação seca (Jackson *et al.*, 1995). A competição pode-se dar entre a planta arbustiva e a herbácea no período de estabelecimento daquela, porém quando a arbustiva atinge a maturidade pode ocorrer o processo de facilitação (Espigares *et al.*, 2004).

Werthein *et al.* (2000) consideram que os dois mecanismos potencialmente mais poderosos para a manutenção da diversidade em comunidade com recursos limitados são a partilha de recursos e a agregação espacial. A partilha de recursos pode ser observada quando as espécies vivem precisamente no mesmo habitat, mas, no entanto, utilizam os recursos diferenciadamente (Begon *et al.*, 2006), o que é desejável para as espécies que coexistem nos sistemas agroflorestais.

Jackson *et al.* (1995) mostraram que pode haver um alto grau de partição na captação da água do solo entre espécies tropicais semi-decíduas, especialmente entre árvores e arbustos, o que é consistente com a alta diferenciação de nichos. Asbjornsen *et al.* (2007) observaram plantas de milho (*Zea mays* L.) captando água até 30 cm de profundidade, enquanto as espécies arbóreas *Quercus macrocarpa* Michx e *Ulmus americana* L. absorviam água em profundidade superior a 30 cm.

De acordo com Ludwig *et al.* (2004), a competição por água do solo é o mais importante processo em ecossistemas savânicos, pois o recurso é limitado nesses ambientes, de forma que sobrevivem somente as espécies que estiverem adaptadas a situações de escassez de água. Todavia, tem-se demonstrado que, mesmo as espécies que não desenvolveram características no sentido de captar ou aproveitar melhor esse recurso, como sistemas de armazenamento ou aumento do sistema radicular, podem sobreviver em períodos onde não haja disponibilidade hídrica nas camadas superficiais do solo, através da facilitação, via redistribuição de água por espécies arbóreas para o componente herbáceo (Ludwig *et al.*, 2003).

Contudo, esse processo é dependente de condições climáticas, como a quantidade de água precipitada no ano (Simmons *et al.*, 2008).

Os estudos realizados mostram que os SAFs podem reduzir em até 65% a erosão e em 28% a lixiviação de nitrogênio, aumentar a biodiversidade e a imobilização do carbono dentro das árvores (Palma *et al.*, 2007), reduzir a evaporação (Ghanbari *et al.*, 2010), aumentar em mais de 100% a biomassa total do sistema (Chauhani *et al.*, 2010), melhorar o pH, a condutividade elétrica, a capacidade de troca catiônica, os teores de bases trocáveis e de carbono orgânico do solo (Sharma *et al.*, 2009) e aumentar a transferência e disponibilidade de nitrogênio, via exsudatos ou formação de micorrizas (Guissou, 2009; Jalonen *et al.*, 2009).

Por outro lado, há pesquisas cujos resultados não mostram benefícios quando pastagens e SAFs são comparados quanto à matéria orgânica ou nutrientes minerais do solo (Tornquist *et al.*, 1999; Reis *et al.*, 2010). Há também aquelas que mostram diminuição em até 30% no rendimento da produção quando o cultivo estava sendo sombreado pelas árvores, o que pôde ser revertido com a poda das árvores (Siles *et al.*, 2010).

Diante do exposto, tem-se as questões: As propriedades do meio físico em sistemas agroflorestais (SAFs) são diferentes quando comparadas a áreas com sistema de cultivo tradicional e com vegetação nativa? Qual o padrão de desenvolvimento morfoecofisiológico das árvores e das plantas cultivadas em SAFs, monocultivos e de vegetação nativa? O tipo de uso da terra influencia propriedades e/ou características indicadoras da qualidade do solo com reflexos sobre o desenvolvimento, processos fisiológicos e produção de biomassa de plantas nativas e cultivadas? Partindo da premissa de que o ambiente físico e a morfoecofisiologia de árvores e de plantas cultivadas apresentam-se diferenciados, havendo uma influência positiva do componente arbóreo sobre o meio e plantas cultivadas. O objetivo geral deste trabalho foi caracterizar o ambiente físico, o comportamento morfoecofisiológico de árvores em sistema agroflorestal e em mata nativa, bem como em plantas cultivadas sob condições de monocultivo e em SAF, assim como avaliar a influência das árvores sobre as propriedades indicadoras da qualidade química do solo.

Este trabalho está dividido em seis capítulos, cinco dos quais resultantes de pesquisas em campo e um referente a experimento desenvolvido em casa de vegetação. O primeiro capítulo aborda os efeitos das árvores sobre o desenvolvimento do milho em sistema agrossilvipastoril comparando às plantas cultivadas em sistema tradicional. O segundo visa observar a existência e os efeitos de competição por água entre milho e pau-branco em condições controladas. O terceiro capítulo apresenta a caracterização e a diferenciação ecofisiológica das árvores de pau-branco em sistema agrossilvipastoril e em mata secundária. O quarto capítulo apresenta o uso inédito de técnicas isotópicas para avaliar as zonas de absorção de água e a ocorrência de competição entre milho e pau-branco em região semiárida. O quinto capítulo apresenta as condições físicas do sistema agrossilvipastoril e da mata secundária, correlacionando-as com a fotossíntese do pau-branco e, por fim, o sexto capítulo apresenta e associa as propriedades químicas do solo ao teor de nutrientes foliares do milho em sistemas de cultivo tradicional e agrossilvipastoril e o teor de nutrientes do pau-branco em mata secundária e sistema agrossilvipastoril.

CAPÍTULO 1

**(Aceito para publicação na revista Pesquisa Agropecuária
Brasileira)**

DESENVOLVIMENTO DO MILHO SOB INFLUÊNCIA DE ÁRVORES DE PAU-BRANCO EM SISTEMA AGROFLORESTAL

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito das árvores de pau-branco (*Cordia oncocalyx*) sobre parâmetros fisiológicos (fotossíntese, condutância estomática, transpiração, eficiência no uso da água e potencial hídrico), altura e biomassa do milho, em diferentes distâncias das árvores em sistema agroflorestal, comparado ao cultivo tradicional. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro tratamentos (distâncias das árvores) e testemunhas (plantas do cultivo tradicional - TR) e cinco repetições. Foram instaladas cinco parcelas em sistema agrossilvipastoril, tendo um exemplar de pau-branco ao centro de cada parcela e milho em quatro distâncias do caule: 1 m, 2 m, 3 m e 4 m. As medidas fisiológicas e a produção de massa seca foram registradas aos 30, 60 e 90 dias após o semeio do milho. As plantas sob a copa do pau-branco, a 1 m e 2 m do caule foram afetadas quanto às trocas gasosas, altura e massa seca. As plantas a 3 m do caule tiveram os resultados mais próximos dos observados no TR, enquanto as plantas a 4 m apresentaram maior fotossíntese, condutância, transpiração, altura e massa seca. As plantas de milho sob a copa são afetadas negativamente pelo sombreamento das árvores, ao diminuir fotossíntese, condutância estomática e transpiração, enquanto as plantas fora da copa são beneficiadas pela presença das árvores no sistema por aumentarem a fixação de carbono e a produção de massa seca.

Palavras-chave: *Cordia oncocalyx*. *Zea mays*. Fotossíntese. Transpiração. Massa seca. Cultivo tradicional.

DEVELOPMENT OF MAIZE UNDER INFLUENCE OF “PAU-BRANCO” TREES IN AGROFORESTRY SYSTEM

Abstract – The objective of this work was to evaluate the effect of pau-branco trees (*Cordia oncocalyx*) on physiological parameters (photosynthesis, stomatal conductance, transpiration, water use efficiency and water potential), height and

biomass of maize at different distances from the trees in an agroforestry system compared to traditional cultivation. The experiment was in a randomized complete block design with four treatments (distances of trees) and testimony (traditional cultivation-TR). Five plots were established in agrosilvopastoral system locating an individual of *C. oncocalyx* at the center and corn planted in four distances from the stem: 1 m, 2 m, 3 m and 4 m. The physiological measurements and dry matter production were recorded at 30, 60 and 90 days after sowing of maize. The plants under the canopy of the pau-branco, at 1 m and 2 m away from the stem were affected as gas exchange, high and dry mass. The results of plants to 3 m away from the stem were closer to those observed in the TR, while the plants to 4 m had higher photosynthesis, stomatal conductance, transpiration and high. The maize plants under the canopy are negatively affected by shade trees, by decreasing photosynthesis, stomatal conductance and transpiration, while the plants outside the canopy are favored by the presence of the trees species in the system by increasing carbon fixation and dry matter production.

Keywords: *Cordia oncocalyx*. *Zea mays*. Photosynthesis. Transpiration. Dry mass. Traditional cultivation.

1 INTRODUÇÃO

O uso da terra caracterizado pelo crescimento de diferentes espécies de plantas arbóreas e herbáceas em associação com culturas agrícolas (silviagrícolas), com animais (silvipastoris) ou com ambos (agrossilvipastoris) constituem os sistemas agroflorestais ou agroflorestas. Esses sistemas apresentam potencial para o uso mais sustentável da terra, pois diversificam a exploração agrícola e a produção florestal e ao mesmo tempo conservam os recursos naturais. Além disso, constituem sistemas de manejo intensivo do agroecossistema que otimizam os benefícios das interações biológicas criadas quando as árvores e/ou arbustos são deliberadamente combinados com as culturas e/ou pecuária (Molua, 2005).

Os componentes arbóreos das agroflorestas podem aumentar consideravelmente a utilização da precipitação em relação a cultivos anuais (Lott et

al., 2003), podem promover maior retenção de água do solo em subsuperfície, em razão do sistema radicular mais profundo, quando comparado às áreas de monocultivo (Wang *et al.*, 2011) e aumentar o potencial de sequestro de carbono (Albrecht; Kandji, 2003). As árvores também atuam na melhoria das condições ambientais locais e no desenvolvimento de outras espécies, o que influencia a produtividade do sistema (Yang *et al.*, 2009), além de aumentar o rendimento do cultivo associado em comparação com monocultivo (Ogol *et al.*, 1999), desde que as espécies arbóreas utilizadas não sejam altamente competitivas com o cultivo (Mathuva *et al.*, 1998).

Em ambientes onde o fator limitante é o baixo teor de nutrientes no solo, a introdução de árvores com folhas com alto teor de nutrientes e decomposição rápida como *Gliricidia* spp. e *Leucaena* spp. (Heineman *et al.*, 1997), pode aumentar consideravelmente a produtividade do sistema. Por outro lado, se o fator em escassez for a água, é possível que as árvores mantenham maior umidade próximo a elas, quer seja por meio do escoamento pelo tronco (Jackson *et al.*, 2000) ou por trazer água de solo profundo via redistribuição hidráulica (Sekiya; Yano, 2002).

A associação entre árvores e cultivos em SAFs possibilita a manutenção dos processos fisiológicos nas plantas cultivadas em períodos de escassez hídrica, sobretudo se houver diferenciação de nichos entre ambos. Um aspecto que deve ser observado quanto à escolha das espécies arbóreas que compõem o sistema agroflorestal é a eficiência no uso da água; árvores com menor uso de água são menos competitivas com o cultivo (Radersma; Ong, 2004). Outro aspecto é a profundidade de alcance do sistema subterrâneo, pois sistema radicular profundo possibilita o uso compartilhado dos recursos oriundos do solo (água e nutrientes) em razão de uma exploração diferenciada (Jackson *et al.*, 1995). De forma contrária, poderá haver competição radicular no solo sob as árvores, além de sombreamento (Schroth *et al.*, 2002). Assim, entende-se que as agroflorestas podem influenciar positiva ou negativamente o cultivo, a depender de características morfológicas e/ou fisiológicas das espécies associadas. Bertomeu (2012) observou queda de 19 a 66% na biomassa aérea e no rendimento do grão de milho em sistema agroflorestal, tendo sido associada ao espaçamento entre as árvores.

Pesquisas que abordam o rendimento do milho em sistema agroflorestal são comuns (Bertomeu, 2012; Mathuva *et al.*, 1998; Pérez-Marin *et al.*, 2006), mas poucas fazem referência a aspectos fisiológicos, sobretudo em região semiárida, como o nordeste brasileiro. Dentre os autores que avaliaram a fisiologia do milho em sistema agroflorestal, Ding e Su (2010) observaram, em região com precipitação pluviométrica anual acima de 2.000 mm, efeitos da presença das árvores sobre a transpiração do milho, o que levou a variações no rendimento do cultivo. Kang *et al.* (2008) avaliaram o efeito da poda das árvores sobre parâmetros fisiológicos do milho e registraram que tal prática aumentava a incidência de radiação fotossinteticamente ativa e permitia maior transpiração, o que reduziu a competição por água e luz; por outro lado, as plantas mais distantes das árvores foram menos afetadas.

Diante do exposto, tem-se como hipótese que o milho sob a copa das árvores em sistema agroflorestal do tipo agrossilvipastoril tem seu desenvolvimento influenciado negativamente, mas fora da copa, é influenciado positivamente pela presença das árvores no sistema. Assim, objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito das árvores de pau-branco sobre parâmetros ecofisiológicos, altura e biomassa do milho cultivado em diferentes distâncias das árvores, comparado ao milho em sistema de cultivo tradicional.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida na Fazenda Crioula, pertencente ao Centro Nacional de Pesquisa de Caprinos e Ovinos (CNPQ) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Caprinos e Ovinos), situada no município de Sobral-CE, a 3°41'S e 40°20'W. O clima da região é do tipo BSw'h', segundo a classificação de Köppen, com estação chuvosa de janeiro a maio. Temperatura e precipitação médias anuais são de 30 °C e 821,6 mm, respectivamente. Os solos da área em estudo apresentam manchas de Luvisolo Crômico Órtico típico e Luvisolo Hipocrômico Órtico típico (Aguiar *et al.*, 2006).

Duas áreas experimentais foram utilizadas: sistema agrossilvipastoril (AGP) e outra com cultivo tradicional (TR). Estas fazem parte de experimento de

longa duração, implantado em 1997, sendo que o AGP foi estabelecido em 1,7 ha, onde é adotado anualmente o cultivo em aleias com largura de três metros. Esse sistema consiste de, aproximadamente, 200 árvores nativas por hectare, correspondendo a 22% de cobertura do solo. O TR consiste de área com 1,3 ha de monocultivo de milho, preparada tradicionalmente, ou seja, com retirada da vegetação e queima dos resíduos. Não houve adição de fertilizantes ou uso de irrigação em nenhum dos sistemas. Após a colheita da cultura, os animais têm acesso à área para se alimentar.

Entre as espécies arbóreas presentes no sistema, o pau-branco [*Cordia oncocalyx* (Allemão) Boraginaceae] foi escolhido por ser comum às áreas, com frequência, dominância e densidade relativas de 36,84%, 79,03% e 58,33%, respectivamente (Campanha *et al.*, 2011). *C. oncocalyx* é uma espécie caducifolia, endêmica da Caatinga. Suas folhas são simples, alternas, oblongas, medindo de 12 a 35 cm de comprimento por 4 a 12 cm de largura. Foram selecionados cinco espécimes pela similaridade no diâmetro à altura do peito (aproximadamente 30 cm), com altura média de 9 m. O surgimento das folhas e a floração acontecem logo no início do período chuvoso (janeiro/fevereiro), a frutificação inicia-se em seguida (março) e os frutos perduram até o início da estação seca (julho/agosto).

O milho (*Zea mays* L. var. catingueiro) foi a espécie avaliada em condições de monocultivo (TR) e em sistema agrossilvipastoril (AGP). Para averiguar o efeito das árvores sobre o cultivo foram delimitadas cinco parcelas no AGP com 8 x 8 m, tendo um exemplar do pau-branco ao centro e quatro linhas de milho, distando 1 m entre si, para cada lado do pau-branco, no sentido Norte-Sul (Figura 1.1), o que totalizou 64 plantas na parcela e 16 por tratamento. O milho foi semeado nos dias 15 e 16 de fevereiro de 2011, no AGP e no TR, e colhido nos dias 17 e 18 de maio, respectivamente. A precipitação foi de 185,0, 193,3, 155,2 e 165,6 mm, nos meses de fevereiro, março, abril e maio, respectivamente. Foram semeadas três sementes por cova, com espaçamento de um metro entre as covas e entre as linhas.

O milho foi plantado a quatro distâncias do caule do pau-branco e os tratamentos foram denominados pelas respectivas distâncias: Mil₁ = 1,0 m; Mil₂ = 2,0 m; Mil₃ = 3,0 m e Mil₄ = 4,0 m. Nas duas primeiras distâncias o milho ficou

completamente sob a copa, a terceira distância era intermediária e na quarta as plantas estavam completamente expostas ao sol (fora da copa), tendo-se considerado a projeção da copa de *C. oncocalyx* ao meio-dia. As coletas e os registros de dados foram realizados aos 30, 60 e 90 dias após o semeio (DAS), o que coincidiu com os meses de março, abril e maio, e com as fases vegetativa, reprodutiva e senil, respectivamente. Para tanto, foi utilizada mensalmente uma linha de milho, no sentido Leste-Oeste. Cada linha continha uma planta por tratamento, em cada parcela, o que totalizou cinco plantas por tratamento. Para coleta no TR foi selecionada aleatoriamente uma linha por mês, no sentido Leste-Oeste, e a cada cinco plantas uma foi coletada, até o total de cinco espécimes.

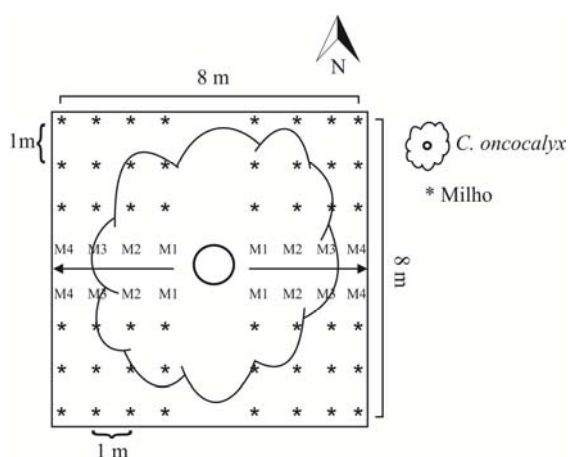


Figura 1.1. Diagrama mostrando a localização das plantas de milho e do pau-branco (*C. oncocalyx*) em cada parcela. As setas indicam o sentido de coleta das plantas e M1, M2, M3 e M4 representam os diferentes tratamentos. Cinco parcelas foram estabelecidas na área experimental.

Aos 30 e 60 DAS foram registrados dados de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), razão entre concentração de CO_2 interna à folha e a do ar (C_i/C_{ar}), temperaturas do ar (T_{ar}) e foliar (T_{fol}), fotossíntese líquida (A), condutância estomática (g_s) e transpiração (E), com uso de um analisador de gás infravermelho (IRGA) (LI-6400, LI-COR Biosciences, USA), tendo-se utilizado a primeira folha apical completamente expandida, uma folha por planta, cinco plantas por tratamento, no horário de 12 às 13h. As concentrações de clorofila no limbo foliar foram medidas por meio de medidor portátil (SPAD-502P, Minolta, Japão) cujos resultados foram representados por meio do índice de conteúdo de clorofila SPAD.

No mês de maio não foi possível realizar essas medidas porque as folhas de milho já estavam secas.

O potencial hídrico (Ψ) foi medido aos 60 DAS, ao meio-dia, com uso de uma câmara de pressão de *Scholander* (Soil Moisture Equipment Corp, USA). Foram utilizadas as mesmas folhas das leituras de clorofila e de trocas gasosas em cinco exemplares de milho para cada tratamento.

Antes de coletar a parte aérea, aos 30, 60 e 90 DAS, as alturas das plantas foram medidas, do colo (limite entre caule e raiz) ao ápice da última folha completamente expandida (30 DAS) ou das inflorescências (60 e 90 DAS). Aos 90 DAS, além da parte aérea, as espigas também foram colhidas. Todo esse material foi pesado para obtenção do peso fresco e, posteriormente, seco em estufa com circulação de ar a 65°C até peso constante. O material foi novamente pesado para obtenção da massa seca da parte aérea (colmo, folhas e inflorescências compuseram uma amostra) e da espiga (considerando palha, sabugo e grãos juntos).

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com cinco repetições, em que as distâncias foram consideradas como tratamentos no AGP e as plantas do TR como testemunhas. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey, admitindo-se até 5% de probabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As temperaturas registradas pelo IRGA no AGP e TR, nos horários de leitura das trocas gasosas (12 às 13h), revelam que a distância das árvores não afetou a temperatura do ar ou da folha de milho aos 30 DAS (Tabela 1.1). Entretanto, aos 60 DAS, a temperatura do ar no TR foi menor que no AGP. Esse não é um fato comumente registrado na literatura, quando se comparam áreas com diferentes coberturas. De acordo com Lemenih *et al.* (2004), quanto maior o percentual de fechamento do dossel e o índice de área foliar, menor a temperatura do ar. Souza *et al.* (2012) registraram um aumento em até seis graus na temperatura do ar onde havia cultivo de café a pleno sol com referência a áreas de sistema

agroflorestal ou floresta. Pérez-Marin *et al.* (2006) registraram menores valores de temperatura do ar sob as árvores de *Gliricidia sepium* em sistema agroflorestal com cultivo de milho, do que a três metros de distância, durante a época chuvosa e ao fim dela.

Aos 60 DAS foi observada menor temperatura foliar nas plantas dos tratamentos Mil₁-Mil₃, comparadas ao Mil₄ (Tabela 1.1), sem, contudo, ter havido diferenças na temperatura do ar entre esses tratamentos. Estes resultados podem ser explicados pelo fato de que plantas adaptadas ao sol pleno, como o milho, em situações de suprimento de água e radiação adequadas mantêm seus processos fisiológicos normalmente e abrem os estômatos para absorção de CO₂ e dissipação de energia na forma de calor. Quando essas condições ambientais não ocorrem, a tendência é que os estômatos sejam fechados, o que aumenta a temperatura no interior da folha. Temperaturas do ar abaixo de 15 °C (Foyer *et al.*, 2002) ou elevadas (acima de 38 °C) podem diminuir a biomassa das plantas de milho, que têm seu melhor desenvolvimento fotossintético entre 32 e 34 °C (Kim *et al.*, 2007); essa faixa está próxima do registrado no AGP e no TR, o que indica que a temperatura do ar não seria diretamente responsável pelas diferenças no desenvolvimento do milho nesses sistemas.

Tabela 1.1. Temperaturas do ar e das folhas de milho medidas das 12 às 13h, aos 30 e 60 dias após o semeio (DAS), em sistema agrossilvipastoril a distâncias de um (Mil₁), dois (Mil₂), três (Mil₃) e quatro (Mil₄) metros do caule de *Cordia oncocalyx* Allemão, comparadas ao sistema de cultivo tradicional (TR)

Tratamento	30 DAS		60 DAS	
	Ar	Folha	Ar	Folha
TR	34,04 ^a	31,48 ^a	33,04 ^b	33,03 ^b
Mil ₁	34,91 ^a	31,34 ^a	35,34 ^a	32,57 ^b
Mil ₂	34,83 ^a	31,20 ^a	35,33 ^a	32,98 ^b
Mil ₃	34,76 ^a	31,10 ^a	35,36 ^a	33,92 ^b
Mil ₄	34,73 ^a	32,02 ^a	35,33 ^a	34,44 ^a

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre tratamentos pelo teste de Tukey (n = 5).

A radiação que chegou às plantas de milho aos 30 e 60 DAS foi maior nos tratamentos Mil₃, Mil₄ e no cultivo tradicional (Figura 1.2). Kang *et al.* (2008) estudaram o efeito das árvores em sistema agroflorestal sobre o desenvolvimento do milho e notaram reduções na radiação fotossinteticamente ativa quando as plantas

estavam mais próximas das árvores, especialmente aos 60 DAS, o que acarretou queda no rendimento do milho. Com a diminuição da taxa de radiação, a absorção de fótons é diminuída, o transporte eletrônico é afetado e a etapa fotoquímica, bem como a fotossíntese, é alterada.

Houve um aumento progressivo nas médias de fotossíntese com o aumento da distância do milho às árvores de *C. oncocalyx* (Figura 1.2), de forma semelhante à radiação interceptada pelas plantas. Reynolds *et al.* (2007) observaram, em milho plantado a dois e seis metros de distância do bordo-açucareiro (*Acer saccharinum*), menor incidência de radiação fotossinteticamente ativa a 2,0 m ($481,0 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$) do que a 6,0 m ($1.420,0 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$), com redução na fotossíntese de 26,9 para $12,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e no rendimento de 3,79 para $7,07 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente.

A fotossíntese do milho foi de 6,6 e $27,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ aos 30 DAS, sob RFA de 244,3 e $714,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, e de 2,29 e $41,83 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ aos 60 DAS, com RFA de 97,1 e 1.839,6, nos tratamentos Mil₁ e Mil₄, respectivamente. Plantas C₄ possuem altos valores de capacidade fotossintética ($55 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ou mais) e o milho não apresenta fotossíntese líquida saturada mesmo sob forte radiação (Larcher, 2006). Kim *et al.* (2007) registraram os maiores valores de fotossíntese (aproximadamente $40,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ao meio dia nas temperaturas entre 30 e 35 °C, com queda acima desse nível de temperatura. Para a temperatura do ar registrada nos horários de leitura de fotossíntese (34-35 °C, Tabela 1.1), o milho sob a copa teve um valor de fotossíntese muito baixo, apenas os valores das plantas mais distantes do caule condizem com os registrados pela literatura como normais para o milho.

Aos 30 e 60 DAS, a condutância estomática foi maior no Mil₄ e houve similaridade entre Mil₁ e Mil₂ e entre Mil₃ e TR aos 60 DAS (Figura 1.2). A transpiração foi maior no Mil₄ e menor nos tratamentos completamente sob a copa das árvores (Mil₁ e Mil₂) aos 30 e 60 DAS, enquanto Mil₃ apresentou valores próximos aos do TR, embora diferentes. Os tratamentos Mil₁ e Mil₂, aos 30 DAS, e todos os do AGP, aos 60 DAS, apresentaram maior razão Ci/Car comparado ao TR. Condutância estomática e transpiração são parâmetros fisiológicos que respondem às variáveis ambientais como umidade do ar e do solo, radiação, concentração de

CO₂ e temperatura do ar. No período de estudo, as chuvas forneceram quantidade adequada de água às plantas de milho. Entretanto, variações na radiação solar, promovidas pelas árvores, possibilitaram transpiração e condutância elevadas apenas nas plantas fora da copa.

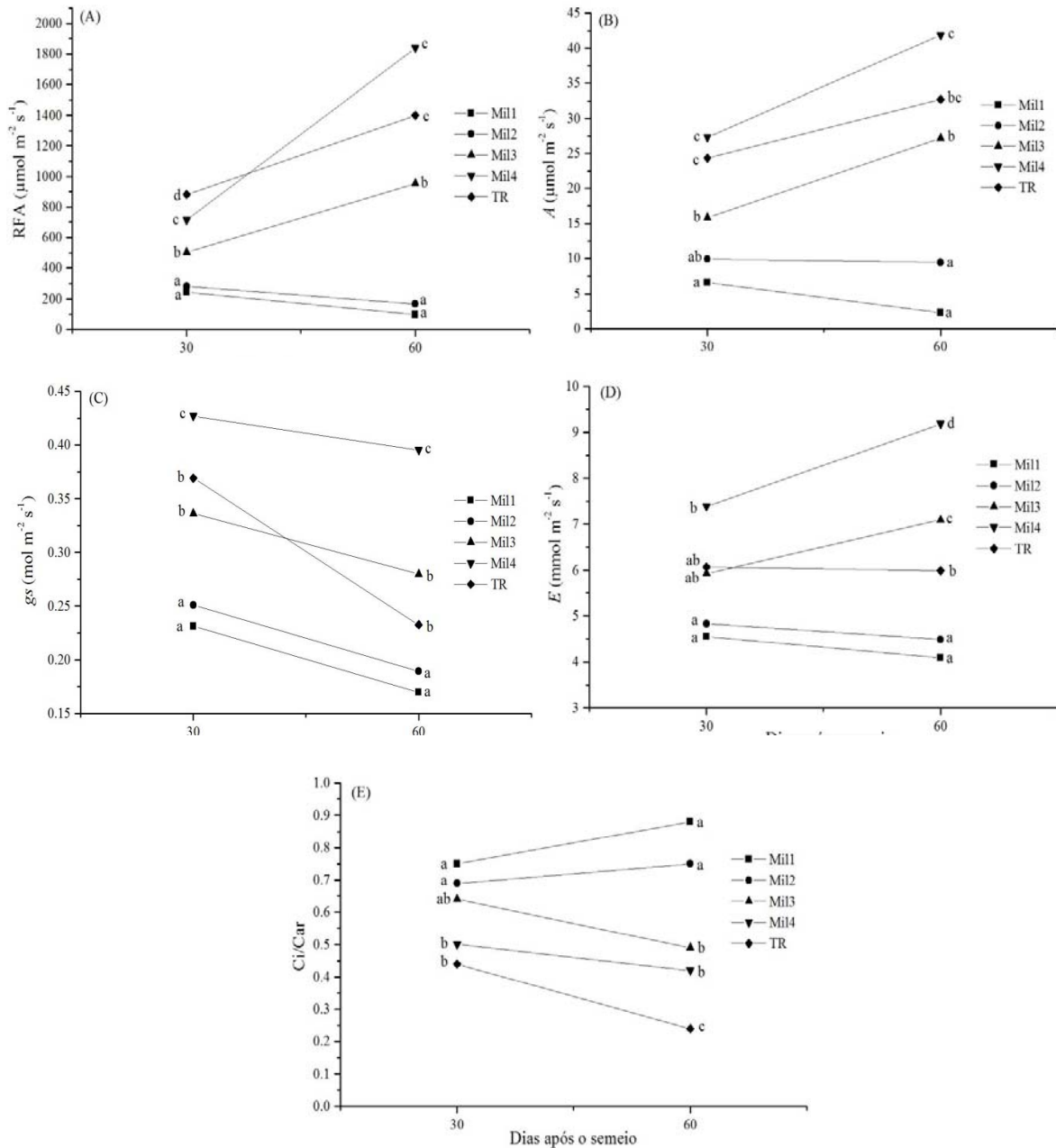


Figura 1.2. A - Radiação fotossinteticamente ativa (RFA); B - Fotossíntese (A); C - Condutância (g_s); D - Transpiração (E); E - Razão entre a concentração interna e externa de CO₂ (Ci/Car), aos 30 e 60 dias após o semeio, em plantas de milho cultivadas em sistema agrossilvipastoril a distâncias de um (Mil₁), dois (Mil₂), três (Mil₃) e quatro (Mil₄) metros do caule de *Cordia oncocalyx* Allemão e em sistema de cultivo tradicional (TR). Médias seguidas de letras iguais não diferem entre tratamentos pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade (n = 5).

As plantas de milho sob a copa mantêm seus estômatos fechados, em razão da baixa intensidade luminosa que a elas chega, o que promove redução na transpiração e na fixação de CO₂. Quando isso acontece aumenta a razão entre a concentração interna de CO₂ e a do ar, em função da baixa radiação fotossinteticamente ativa, conforme demonstraram Fuentes e King (1989). Quando esse CO₂ das câmaras subestomáticas é incorporado pela PEPcase (enzima catalisadora na etapa bioquímica da fotossíntese de plantas C₄), há necessidade de ajustar a abertura dos estômatos para que ocorram novas captações de carbono da atmosfera, todavia, se a radiação incidente não favorece esse processo, a planta sofre prejuízos. A absorção de luz reduzida prejudica também a etapa fotoquímica da fotossíntese, a cadeia de transporte de elétrons e, por fim, parte da produção de energia necessária à etapa bioquímica, na qual há conversão de CO₂ em açúcares, o que afeta a fotossíntese como um todo.

Aos 30 dias após o semeio, o teor de clorofila foi muito semelhante entre os tratamentos do AGP e TR (Figura 1.3). Aos 60 DAS o índice SPAD no TR foi bem inferior aos do milho no AGP. Concentrações de clorofila são diretamente relacionadas ao sombreamento, de forma que quanto maior o sombreamento maior o teor de clorofila (Rego; Possamai, 2006). Como não foi observada essa relação entre radiação e teor de clorofila, é provável que outro fator tenha atuado e diferenciado as plantas entre os dois sistemas, como quantidade reduzida de N foliar, em decorrência de baixo teor de N total no solo do TR, conforme constatado por Maia *et al.* (2008), ou o estágio fisiológico, uma vez que as plantas no TR possivelmente estivessem iniciando o processo de senescência. As plantas do AGP, até mesmo as que estavam fora da copa, apresentaram teores elevados de clorofila, maiores que os do TR, o que indica efeito da permanência das árvores nesse sistema, possivelmente sobre o teor de nutrientes do solo.

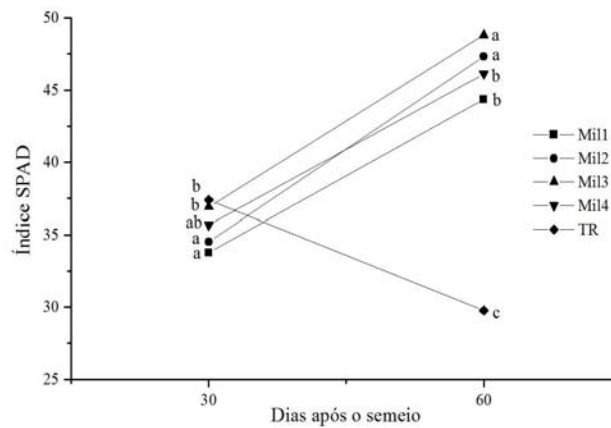


Figura 1.3. Teores de clorofila registrados aos 30 e 60 dias após o semeio em plantas de milho cultivadas em sistema agrossilvipastoril, nas distâncias de um (Mil_1), dois (Mil_2), três (Mil_3) e quatro (Mil_4) metros do caule de *Cordia oncocalyx* Allemão e em sistema de cultivo tradicional (TR). Médias seguidas de letras iguais não diferem entre tratamentos pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade ($n = 5$).

O potencial hídrico (Ψ) ao meio-dia foi semelhante entre os tratamentos no AGP, mas diferente entre eles e o TR, que apresentou os menores valores (Figura 1.4). O solo mais exposto no TR pode ter promovido maior perda de água por evaporação, que se refletiu em menor Ψ nas plantas desse sistema. As árvores mantidas em sistemas agroflorestais podem aumentar a disponibilidade de água e a utilização da água das chuvas para o cultivo com melhorias nas propriedades físicas do solo, por reduzir as perdas de água por escoamento e por melhorar o microclima pela redução da demanda evaporativa (Lott *et al.*, 2003).

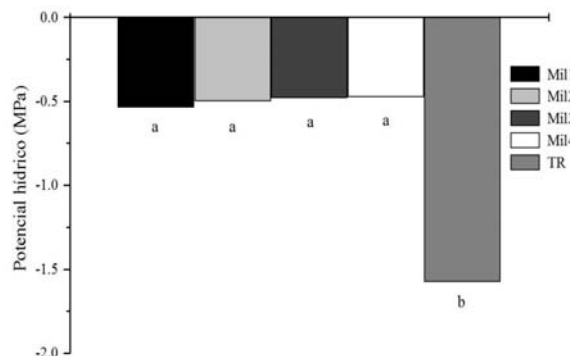


Figura 1.4. Potencial hídrico ao meio-dia, aos 60 dias após o semeio, em plantas de milho cultivadas em sistema agrossilvipastoril, a distâncias de um (Mil_1), dois (Mil_2), três (Mil_3) e quatro (Mil_4) metros do caule de *Cordia oncocalyx* Allemão e em sistema de cultivo tradicional (TR), Fazenda Crioula, Sobral-CE. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre tratamentos pelo teste de Tukey, a 1% de probabilidade ($n = 5$).

Maiores valores de Ψ revelam um melhor estado hídrico, o que possibilita maiores condutância estomática e transpiração, uma vez que estas são diretamente proporcionais ao potencial hídrico da planta, conforme demonstrado por Paiva *et al.* (2005). Todavia, se a água no solo não foi um fator limitante às trocas gasosas no período chuvoso, os baixos valores de fotossíntese, transpiração e condutância dos tratamentos sob a copa no presente trabalho resultaram da atenuação da radiação pelas árvores de *C. oncocalyx*.

As plantas de milho apresentaram maior altura conforme aumentou a distância do pau-branco (Tabela 1.2). As plantas mais altas foram encontradas no tratamento Mil₄, onde estavam completamente fora da copa, provavelmente, em razão de o milho ser uma espécie que não suporta sombreamento (Reynolds *et al.*, 2007), o que explica o baixo desenvolvimento do milho mais próximo do caule do pau-branco, além das árvores interceptarem parte da radiação disponível para o cultivo (Kho, 2000). Muthuri *et al.* (2005) encontraram diferenças na altura do milho somente a um metro de distância do caule das árvores de *Grevillea robusta*, onde o milho em SAF apresentava-se menor que no cultivo isolado. Esse fato pode ser dependente do tamanho da copa e do índice de área foliar das arbóreas.

Tabela 1.2. Altura, massa seca da parte aérea (MSPA) e da espiga (MSEsp) de plantas de milho, aos 30, 60 e 90 dias após o semeio (DAS), em sistema agrossilvipastoril nas distâncias de um (Mil₁), dois (Mil₂), três (Mil₃) e quatro (Mil₄) metros do caule de *Cordia oncocalyx* Allemão e em sistema de cultivo tradicional (TR)

Tratamento	30 DAS		60 DAS		90 DAS		
	Altura (cm)	MSPA (g planta ⁻¹)	Altura (cm)	MSPA (g planta ⁻¹)	Altura (cm)	MSPA (g planta ⁻¹)	MSEsp (g planta ⁻¹)
TR	46,6 ^b	7,38 ^a	151,0 ^b	24,49 ^a	169,0 ^b	40,25 ^a	75,32 ^a
Mil ₁	51,0 ^b	3,27 ^c	126,0 ^b	10,05 ^b	156,0 ^b	17,74 ^c	17,92 ^c
Mil ₂	51,9 ^b	4,50 ^b	160,4 ^b	22,23 ^a	171,6 ^b	25,38 ^b	26,75 ^b
Mil ₃	59,7 ^a	6,00 ^a	163,4 ^b	18,36 ^a	177,8 ^b	21,76 ^b	26,02 ^b
Mil ₄	65,8 ^a	7,25 ^a	190,0 ^a	29,61 ^a	194,0 ^a	34,73 ^a	73,16 ^a

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (n = 5).

Houve diferença na massa seca da parte aérea entre os tratamentos aos 30, 60 e 90 DAS, tendo sido encontrados os menores valores no tratamento Mil₁ e valores semelhantes entre Mil₄ e TR (Tabela 1.2). Comparado ao TR, a massa seca da espiga foi menor nos tratamentos Mil₁, Mil₂ e Mil₃, enquanto em foram semelhantes. Segundo Black e Ong (2000), a produção de matéria seca é maior em

ambientes com boa disponibilidade de luz. Quando observaram o efeito do sombreamento de árvores em sistema agroflorestal sobre o rendimento do milho, Ding e Su (2010) concluíram que as razões para a queda no rendimento das plantas sombreadas, em comparação com as completamente expostas ao sol, estavam relacionadas a alterações na radiação fotossinteticamente ativa incidente, temperatura do ar e concentração de CO₂. No presente trabalho, entre os parâmetros físicos observados, a radiação, e não a temperatura do ar, influenciou a produção de massa seca do milho. Assim, é recomendável que seja evitado o plantio de milho sob a copa de árvores que atenuam acentuadamente a incidência de radiação solar, como o pau-branco.

4 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do milho sob a copa do pau-branco é afetado pelo sombreamento ao reduzir a radiação incidente. O sistema agrossilvipastoril permite uma melhor manutenção do estado hídrico das plantas de milho. O milho plantado a quatro metros de distância do caule das árvores fotossintetiza mais e produz massa seca aérea e de frutos semelhante ao cultivado em sistema tradicional.

REFERÊNCIAS

Aguiar, M.I.; Maia, S.M.F.; Oliveira, T.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J. A., 2006. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. *Revista Ciência Agronômica*, 37:270-278.

Albrecht, A.; Kandji, S.T., 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99:15-27.

Bertomeu, M., 2012. Growth and yield of maize and timber trees in smallholder agroforestry systems in Claveria, northern Mindanao, Philippines. *Agroforestry Systems*, 84:73-87.

Black, C.; Ong, C., 2000. Utilisation of light and water in tropical agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 104:25-47.

Campanha, M.M.; Araujo, F.S.; Menezes, M.O.; Silva, V.M.A.; Medeiros, H.R., 2011. Structure of plantcommunity of shrubs and trees in agrosilvopasture system, in Sobral – CE. *Revista Caatinga*, 24:94-101.

Ding, S.; Su, P., 2010. Effects of tree shading on maize crop within a Poplar-maize compound system in Hexi Corridor oasis, northwestern China. *Agroforestry Systems*, 80:117-129.

Foyer, C.H.; Vanacker, H.; Gomez, L.D.; Harbinson, J., 2002. Regulation of photosynthesis and antioxidant metabolism in maize leaves at optimal and chilling temperatures: review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 40:659-668.

Fuentes, J.D.; King, K.M., 1989. Leaf photosynthesis and leaf conductance of maize grown hydroponically and in soil under field conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 45:155-166.

Heineman, A.M.; Otieno, H.J.O.; Mengich, E.K.; Amadalo, B.A., 1997. Growth and yield of eight agroforestry tree species in line plantings in Western Kenya and their effect on maize yields and soil properties. *Forest Ecology and Management*, 91:103-135.

Jackson, P.C.; Cavelier, J.; Goldstein, G.; Meinzer, F.C.; Holbrook, N.M., 1995. Partitioning of water resources among plants of a lowland tropical forest. *Oecologia*, 101:197-203.

Jackson, N.A.; Wallace, J.S.; Ong, C.K., 2000. Tree pruning as a means of controlling water use in an agroforestry system in Kenya. *Forest Ecology and Management*, 126:133-148.

Kang, H.; Shannon, D.A.; Prior, S.A.; Arriaga, F.J., 2008. Hedgerow pruning effects on light interception, water relations and yield in alley-cropped maize. *Journal of Sustainable Agriculture*, 31:115-137.

Kho, R.M., 2000. A general tree-environment-crop interaction equation for predictive understanding of agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 80:87-100.

Kim, S-H.; Gitz, D.C.; Sicher, R.C.; Baker, J.T.; Timlin, D.J.; Reddy, V.R., 2007. Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in maize under elevated CO₂. *Environmental and Experimental Botany*, 61:224-236.

Larcher, W., 2006. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: RiMa. 550p.

Lemenih, M.; Gidyelew, T.; Teketay, D., 2004. Effects of canopy cover and understory environment of tree plantations on richness, density and size of colonizing woody species in southern Ethiopia. *Forest Ecology and Management*, 194:1-10.

Lott, J.E.; Khan, A.A.H.; Black, C.R.; Ong C.K., 2003. Water use in a *Grevillea robusta*-maize overstorey agroforestry system in semi-arid Kenya. *Forest Ecology and Management*, 180:45-59.

Maia, S.M.F.; Xavier, F.A.S.; Oliveira, T.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J.A., 2008. Frações de nitrogênio em Luvissole sob sistemas agroflorestais e convencional no semiárido cearense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:381-392.

Mathuva, M.N.; Rao, M.R.; Smithson, P.C.; Coe, R., 1998. Improving maize (*Zea mays*) yields in semiarid highlands of Kenya: agroforestry or inorganic fertilizers? *Field Crops Research*, 55:57-72.

Molua, E.L., 2005. The economics of tropical agroforestry systems: the case of agroforestry farms in Cameroon. *Forest Policy and Economics*, 7:199-211.

Muthuri, C.W.; Ong, C.K.; Black, C.R.; Ngumi, V.W.; Mati, B.M., 2005. Tree and crop productivity in *Grevillea*, *Alnus* and *Paulownia*-based agroforestry systems in semi-arid Kenya. *Forest Ecology and Management*, 212:23-39.

Ogol, C.K.P.O.; Spence, J.R.; Keddie, A., 1999. Maize stem borer colonization, establishment and crop damage levels in a maize-leucaena agroforestry system in Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 76:1-15.

Paiva, A.S.; Fernandes, E.J.; Rodrigues, T.J.D.; Turco, J.E.P., 2005. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes irrigações. *Engenharia Agrícola*, 25:161-169.

Pérez-Marin, A.M.; Menezes, R.S.C.; Silva, E.D.; Sampaio, E.V.S.B., 2006. Efeito da *Gliricidia sepium* sobre nutrientes do solo, microclima e produtividade do milho em sistema agroflorestal no Agreste Paraibano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30:555-564.

Radersma, S.; Ong, C.K., 2004. Spatial distribution of root length density and soil water of linear agroforestry systems in sub-humid Kenya: implications for agroforestry models. *Forest Ecology and Management*, 188:77-89.

Reynolds, P.E.; Simpson, J.A.; Thevathasan, N.V.; Andrew, M.G., 2007. Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in Southern Ontario, Canada. *Ecological Engineering*, 29:362-371.

Schroth, G.; D'Angelo, S.A.; Teixeira, W.G.; Haag, D.; Lieberei, R., 2002. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. *Forest Ecology and Management*, 163:131-150.

Sekiya, N.; Yano, K., 2002. Water acquisition from rainfall and groundwater by legume crops developing deep rooting systems determined with stable isotope compositions of xylem waters. *Field Crops Research*, 78:133-139.

Souza, H.N.; Goede, R.G.M.; Brussaard, L.; Cardoso, I.M.; Duarte, E.M.G.; Fernandes, R.B.A.; Gomes, L.C.; Pulleman, M.M., 2012. Protective shade, tree

diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 146:179-196.

Wang, Y.; Zhang, B.; Lin, L.; Zepp, H., 2011. Agroforestry system reduces subsurface lateral flow and nitrate loss in Jiangxi Province, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140:441-453.

Yang, L.; Liu, N.; Ren, H.; Wang, J. Facilitation by two exotic *Acacia*: *Acacia auriculiformis* and *Acacia mangium* as nurse plants in South China. *Forest Ecology and Management*, 257:1786-1793.

CAPÍTULO 2

(Enviado à Revista Bragantia)

FISIOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DE DUAS ESPÉCIES ASSOCIADAS SOB DÉFICIT HÍDRICO

Resumo - Em sistemas agroflorestais a coexistência de árvores e culturas favorece a qualidade do solo em vários aspectos, apesar disso, esta associação pode levar à competição entre as plantas nestes sistemas. Todavia, observações de campo são limitadas no sentido de se testar a competição por água. Objetivou-se, neste estudo, avaliar parâmetros fisiológicos e de desenvolvimento do pau-branco (*Cordia oncocalyx*) e do milho (*Zea mays*) em dois níveis de irrigação, cultivados em associação e isoladamente em vasos. Experimento foi conduzido em ambiente controlado, em esquema fatorial completo (2 x 2 x 2), consistindo em duas espécies (pau-branco e milho), dois tipos de cultivo (plantas em associação ou isoladas) e dois níveis de irrigação (100% e 50% da capacidade de campo). Variáveis fisiológicas e de desenvolvimento foram registradas em duas coletas, 15 e 30 dias após a diferenciação dos tratamentos quanto ao nível de umidade do solo. A associação praticamente não afetou parâmetros fisiológicos como fotossíntese, condutância estomática, transpiração e eficiência no uso da água. Todavia, esses processos fisiológicos foram alterados pelo nível de irrigação, com os piores resultados registrados para aquelas desenvolvidas a 50% da capacidade de campo tanto no milho quanto no pau-branco. O nível de umidade do solo e a associação tiveram efeito negativo sobre o desenvolvimento das plantas ao afetar a massa seca, área foliar, taxas de crescimento absoluto, razão raiz/parte aérea e área foliar específica do milho e do pau-branco, como reflexo da competição tanto a 100% quanto a 50% da capacidade de campo, tendo sido o milho a espécie mais prejudicada.

Palavras-chave: *Cordia oncocalyx*. Milho. Trocas gasosas. Eficiência no uso da água. Taxa de crescimento absoluto.

PHYSIOLOGY AND DEVELOPMENT OF TWO SPECIES ASSOCIATED UNDER WATER DEFICIT

Abstract - In agroforestry system the trees and crop coexist favoring the soil quality in many aspects, but, nonetheless, this association can lead to competition between plants in these systems. However, field observations are limited in order to test the competition for water. We aim, in this study, to evaluate physiological and development parameters from *Cordia oncocalyx* and maize at two levels of irrigation, cultivated alone and in combination in pots. Experiment was conducted in a controlled environment in a full factorial (2 x 2 x 2), consisting of two species (*C. oncocalyx* and maize), two types of cultivation (isolated or associated) and two levels of irrigation (100% e 50% of field capacity). Development and physiological variables were recorded in two collections, 15 and 30 days after the differentiation of treatments on the level of soil moisture. The association practically did not affect physiological parameters such as photosynthesis, stomatal conductance, transpiration and water use efficiency. However, these physiological processes were changed due to the level of irrigation, with the worst results recorded for those grown at 50% of field capacity both in maize and in *C. oncocalyx*. The level of irrigation and the association had a negative effect on plant development by affecting dry weight, leaf area, absolute growth rates, the root/shoot and specific leaf area in maize and *C. oncocalyx*, reflecting the competition to 100% as much as 50% of field capacity, and the maize is the most impaired specie.

Keywords: *Cordia oncocalyx*. Maize. Gas exchange. Water use efficiency. Growth rate.

1 INTRODUÇÃO

O milho, que está entre os três cereais mais cultivados no mundo, constitui-se como fonte básica de alimento para muitas populações (CIB, 2012). Muitos estudos sobre o cultivo de milho têm sido feitos visando identificar as condições ideais para uma elevada produtividade de grãos e, com isso, o uso de

métodos de produção alternativos ao monocultivo tem sido estudado (Heineman *et al.*, 1997; Makumba *et al.*, 2006; Gao *et al.*, 2009).

Tais pesquisas mostram que associar milho com outras espécies pode ser benéfico. A associação, por exemplo, com *Leucaena leucocephala* e *Gliricidia sepium*, pode proporcionar ao milho maior rendimento em decorrência da rápida decomposição das folhas dessas duas espécies arbóreas (Heineman *et al.*, 1997; Costa *et al.*, 2004), o que promove aumento na disponibilidade de nutrientes do solo. Pesquisas desenvolvidas por Gao *et al.* (2009) mostram que o rendimento do milho em consórcio com trigo aumenta em até 98% se contrastado com o monocultivo.

Sistemas agroflorestais (SAFs), os quais preveem a coexistência de árvores e culturas e/ou pecuária, podem promover associações benéficas, uma vez que características físicas do ambiente são mantidas, possibilitando menores perdas de água e de solo por erosão (Aguiar *et al.*, 2006), bem como menor resistência à penetração de raízes (Silva *et al.*, 2011), em comparação a áreas de cultivo tradicional.

O milho é uma espécie comercial comumente cultivada nos sistemas agroflorestais brasileiros, mas pouco se sabe sobre os efeitos da associação entre espécies arbóreas e o milho quanto a aspectos fisiológicos, como trocas gasosas e uso da água, por exemplo, quando em situação de déficit hídrico, como é possível acontecer em regiões semiáridas. Assim, a ocorrência de competição entre o cultivo e a espécie arbórea associada em SAFs deve ser considerada quando os recursos, tais como água, forem limitantes, o que culminaria em quedas no rendimento da espécie cultivada em comparação ao monocultivo (Mcintyre *et al.*, 1997).

Mendes *et al.* (2013) observaram redução na produção de biomassa do milho que se desenvolveu sob a copa de árvores em sistema agrossilvipastoril, o que foi atribuído à competição por luz. Assim, adicionalmente, seria possível haver competição por água entre milho e uma espécie arbórea desenvolvendo-se em associação? De acordo com Cannel *et al.* (1996), benefícios no rendimento físico das plantas em sistemas agroflorestais acontecem somente quando há complementaridade na captura de recursos por árvores e cultivos. Entretanto, experimentos de campo para responder a essa questão não são facilmente

manipuláveis, sendo necessários testes em vaso, onde se torna possível isolar o fator a ser testado.

A redução no rendimento das espécies cultivadas em decorrência do déficit hídrico é reflexo de alterações fisiológicas como fechamento estomático, para evitar perda de água por transpiração, e as limitações nos processos ligados à fotossíntese. Estudos que revelem o comportamento fisiológico e o desenvolvimento do milho em diferentes situações (sob estresse hídrico ou não, com ou sem associação com outras espécies vegetais) podem contribuir para o conhecimento de como são as relações hídricas no milho em tais situações, norteando as formas de manejo do sistema de cultivo.

O pau-branco (*Cordia oncocalyx* Allemão) é uma espécie arbórea comum no semiárido brasileiro e por sua ampla ocorrência em experimento de longa duração com SAFs no estado do Ceará faz-se necessária a análise de sua interferência sobre as plantas cultivadas nesses sistemas. Partindo da hipótese que o milho e o pau-branco em associação competem por água apenas quando se desenvolvem em nível reduzido de umidade, objetivou-se avaliar parâmetros fisiológicos e de desenvolvimento das duas espécies em dois níveis de irrigação (50% e 100% de umidade do solo em relação à capacidade de campo), cultivadas em associação e isoladamente em vasos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Frutos de pau-branco caídos foram coletados e as sementes extraídas para produção das mudas. Logo após a extração, as sementes foram esterilizadas com hipoclorito de sódio a 5% e colocadas em placa de *petri* contendo papel Gernitest[®]. Posteriormente, as placas com as sementes foram depositadas em câmaras de germinação, com fotoperíodo de 12 horas e temperatura alternando entre 30 e 25 °C (dia/noite), por cinco a 10 dias para emissão das radículas, e em seguida foram semeadas em sacos de polietileno contendo substrato constituído pela mistura de solo e húmus na proporção volumétrica de 2:1, onde permaneceram por cinco dias.

As plântulas foram, então, repicadas para vasos contendo seis quilos do substrato descrito anteriormente ao qual foram adicionados 4,0 g de calcário dolomítico e 4,0 g de FTE BR-12, equivalente a 1,05 t ha⁻¹. Um mês após o plantio do pau-branco, foi adicionada, em cada vaso, uma solução contendo 5,0 g de NPK para 200 mL de água, correspondendo a 1,3 t ha⁻¹. Uma segunda adubação com a mesma quantidade de NPK (10:10:10) foi realizada antes de plantar o milho, a fim de evitar competição por nutrientes. As características químicas do substrato à época do plantio do pau-branco foram: nitrogênio total - 1,04 g kg⁻¹, carbono orgânico total - 30,01 g kg⁻¹, P disponível - 170,21 mg kg⁻¹, K⁺ trocável - 49,71 mg kg⁻¹, Na⁺ trocável - 23,14 mg kg⁻¹, Ca²⁺ trocável - 2,70 mg kg⁻¹, Mg²⁺ trocável - 1,34 mg kg⁻¹ e pH em água (1:2,5) de 6,7, determinadas seguindo metodologia proposta por Embrapa (1997).

As plantas de pau-branco cresceram nos vasos por um período de cinco meses até atingirem a altura média de 40 cm, quando as plantas já estavam bem estabelecidas, e então, fez-se o plantio do milho. Foram semeadas três sementes de milho por vaso da variedade Catingueiro (safra 2011), na profundidade de três centímetros, a uma distância de 10 cm do caule das plantas de pau-branco, para os tratamentos nos quais as espécies estariam em associação, e em posição central nos vasos destinados ao cultivo isolado. O desbaste de duas plantas de milho foi feito uma semana após a germinação, a fim de evitar competição intraespecífica.

Os tratamentos foram denominados tendo como referência a presença ou ausência de associação entre as duas espécies e os dois níveis de umidade utilizados, conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Designação dos tratamentos do pau-branco (*Cordia oncocalyx*) e do milho (*Zea mays*) desenvolvendo-se em associação ou isoladamente sob 50% ou 100% da capacidade de campo (CC)

Espécie	Plantas isoladas		Plantas associadas	
	50% CC	100% CC	50% CC	100% CC
Pau-branco	PB ₅₀	PB ₁₀₀	PB/Mil ₅₀	PB/Mil ₁₀₀
milho	Mil ₅₀	Mil ₁₀₀	Mil/PB ₅₀	Mil/PB ₁₀₀

A capacidade de campo foi considerada como a quantidade de água retida no solo após o excesso ter sido drenado e a taxa de movimento descendente

ter decrescido acentuadamente. A CC foi determinada gravimetricamente após umedecimento dos vasos até a saturação do solo e drenagem livre até cessar o escoamento da água, do qual se obteve o valor de 20%. Esse percentual e 10% foram considerados, respectivamente, como a umidade do solo nos tratamentos 100% e 50% da CC, controlada durante a condução do experimento por meio de sensores de umidade (ECH₂O, Decagon Devices, WA, USA) instalados nos vasos, após calibração. A água evapotranspirada foi repostada em dias alternados, visando manter a umidade do solo de acordo com os tratamentos definidos. O início dos tratamentos quanto à umidade aconteceu sete dias após a germinação do milho, quando se deu início à contagem dos dias do experimento.

As avaliações de fotossíntese (*A*), condutância estomática (*gs*) e transpiração (*E*) foram realizadas 15 dias (C1) e 30 dias (C2) após o início dos tratamentos quanto ao nível de umidade, o que correspondeu aos dias 22 de junho e 7 de julho de 2011, respectivamente, nos horários de 10 às 11h, em junho, e entre 11 e 12h em julho. Para estas avaliações utilizou-se um analisador de gás infravermelho (IRGA) (LI-6400, LI-COR Biosciences, USA), sob condições de temperaturas e umidade do ambiente. Radiação artificial de 1.600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ foi utilizada para evitar diferenças momentâneas entre os tratamentos. A eficiência no uso da água (EUA) foi calculada pela razão entre fotossíntese e transpiração.

Para obtenção da massa fresca, os exemplares de milho e pau-branco foram coletados após os registros fisiológicos, pesados, separando-se raízes, caule/colmo e folhas. As folhas foram em seguida medidas para obtenção da área foliar (LI-3100, LI-COR Biosciences, USA). O material vegetal foi, então, seco em estufa com circulação de ar a 65 °C até peso constante, obtendo-se, assim, a massa seca. A área foliar específica (AFE) foi calculada pela razão entre a área foliar e a massa seca foliar de cada planta. A razão raiz/parte aérea foi calculada dividindo-se o valor de massa seca das raízes pelo das folhas + caule.

As taxas de crescimento absoluto (TCA) foram calculadas pela equação: $TCA = (Wt_2 - Wt_1)/(t_2 - t_1)$, onde Wt_2 e Wt_1 são as massas secas totais de duas amostras sucessivas e $t_2 - t_1$ os dias decorridos entre as duas observações.

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, com cinco repetições em cada coleta, adotando-se o esquema fatorial completo 2 x 2 x 2

(espécies x associação x níveis de irrigação). Os dados de massa seca, razão raiz/parte aérea, área foliar, área foliar específica e taxas de crescimento foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas por meio do teste de Tukey até 5% de probabilidade. Os dados fisiológicos são apresentados por meio de estatística descritiva (média \pm erro padrão), em gráficos de barras construídos com o software Microcal Origin™.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A condutância estomática (g_s), transpiração (E) e fotossíntese (A) das duas espécies estudadas (pau-branco e milho) foram maiores nos tratamentos a 100% da CC, tanto em C1 quanto em C2. A exceção foi o tratamento Mil/PB₁₀₀ na C1 cuja g_s e A foram semelhantes aos tratamentos a 50% da CC (Figuras 2.1A e B), o que sugere competição por água entre as duas espécies na fase inicial de desenvolvimento do milho. As elevadas taxas de g_s na C2 em PB₁₀₀ e PB/Mil₁₀₀ indicam melhor status hídrico do pau-branco nestes tratamentos do que as plantas de milho nos respectivos tratamentos.

Fisiologicamente (A , g_s e E), houve semelhança entre Mil₁₀₀ e Mil/PB₁₀₀ na C2, indicando ausência de efeito negativo da associação quando em boa umidade do solo e, conseqüentemente, de competição por água entre o milho e o pau-branco. Em campo, Lott *et al.* (2003) observaram que árvores jovens de *Grevillea robusta* apresentavam maior perda de água por transpiração quando se desenvolviam isoladamente do que em SAF envolvendo grevílea e milho. Dessa forma, a associação pode até mesmo auxiliar na manutenção do equilíbrio hídrico das espécies associadas, o que também é evidenciado pelos menores valores em g_s , A e E observados em Mil₅₀ na C2 (Figura 2.1B).

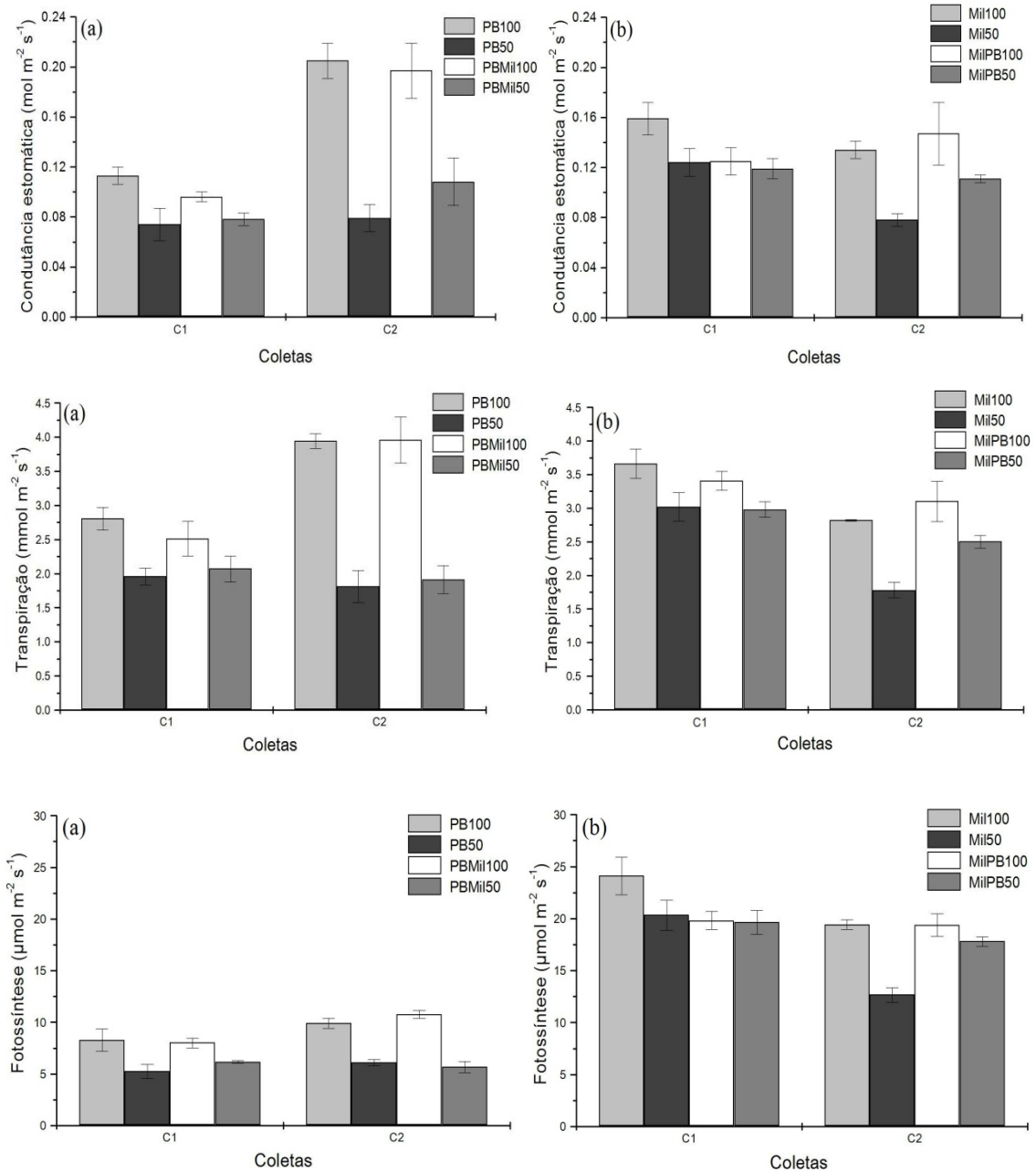


Figura 2.1. Condutância estomática, transpiração e fotossíntese líquida em folhas de A) pau-branco (*Cordia oncocalyx*) e de B) milho (*Zea mays*), isolados (PB; Mil) e associados (PB/Mil; Mil/PB), sob dois níveis de umidade: 100% e 50% da capacidade de campo. As barras representam o erro padrão.

A fotossíntese registrada para as plantas de milho (entre 20 e 24 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) é inferior à observada em condições de campo (Capítulo 1) para uma radiação natural semelhante à utilizada neste experimento. Todavia, deve ser considerado que plantas jovens (como em C2) fotossintetizam menos que aos 60 DAS (como registrado no Capítulo 1). Apenas as plantas do tratamento Mil₅₀ apresentaram A reduzida, coincidindo com os valores registrados por Lott *et al.* (2003) para plantas

cultivadas a um metro do tronco de pau-branco em SAFs, o que foi atribuído à baixa interceptação da radiação solar. Tais fatos indicam que as plantas em Mil₅₀ estão submetidas a algum tipo de estresse, nesse caso, possivelmente o hídrico. Para o pau-branco, a *A* nos tratamentos com umidade a 100% da CC coincide com os valores registrados ao meio-dia (cerca de 10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) nos meses de boa disponibilidade hídrica e, naqueles submetidos à umidade do solo a 50% da CC, a *A* corresponde ao registrado para os meses secos (entre 3 e 6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Capítulo 3). Tais resultados mostram que a *A* no pau-branco é primordialmente influenciada pela umidade do solo.

O pau-branco apresentou elevadas taxas de transpiração para baixas taxas de fotossíntese, o que fez com que a espécie apresentasse eficiência no uso da água (EUA) reduzida em comparação com o milho (Figuras 2.1A e B). Essas diferenças estão associadas ao tipo de ciclo de fixação de carbono, que é distinto entre espécies denominadas C₃, como o pau-branco, e C₄, como o milho, em decorrência da presença de bainha vascular e ausência de fotorrespiração em plantas C₄. Plantas que apresentam ciclo C₄ mantêm altas taxas de assimilação de CO₂ o que lhes confere maior eficiência intrínseca no uso da água e uma tendência a ocupar ambientes mais secos do que as plantas com ciclo C₃ (Muthuri *et al.*, 2009).

A eficiência no uso da água diferiu entre os tratamentos a 100% e a 50% da CC na C2, sendo maior naqueles a 50% da CC, tanto para o pau-branco quanto para o milho. Plantas que se desenvolvem sob moderado estresse hídrico podem apresentar maior eficiência no uso da água do que plantas bem irrigadas (Li *et al.*, 2001), uma vez que a EUA comumente aumenta com o declínio do teor de água no solo (Muthuri *et al.*, 2009). A ausência de diferenças na EUA entre os tratamentos de milho e entre os de pau-branco na C1 indica que esse parâmetro não é afetado pelo estresse hídrico antes de decorridos 15 dias.

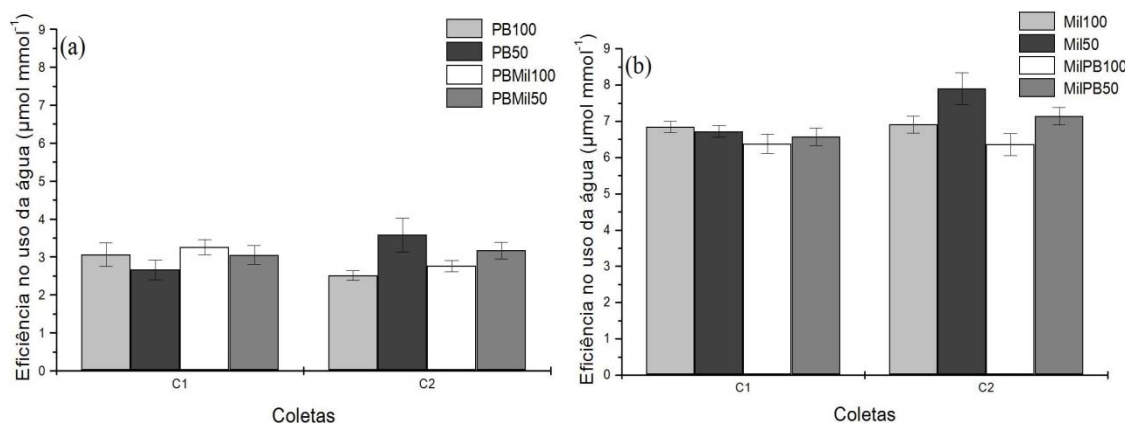


Figura 2.2. Eficiência no uso da água de A) pau-branco (*Cordia oncocalyx*) e B) milho (*Zea mays*), isolados (PB; Mil) e associados (PB/Mil; Mil/PB), sob dois níveis de umidade: 100% e 50% da capacidade de campo. As barras representam o erro padrão.

Diante do estresse hídrico, as plantas têm seus processos fisiológicos alterados, resultando em menores g_s , A e E (Kakani *et al.*, 2009). Neste experimento, o milho, principalmente Mil_{50} , foi negativamente afetado pelo nível reduzido de irrigação, o que também aconteceu com o pau-branco. Entretanto, A , g_s e E foram mantidas, entre 15 e 30 dias após o início da diferenciação da umidade (C1 e C2, respectivamente), nos tratamentos PB_{50} e PB/Mil_{50} e aumentaram nos tratamentos PB_{100} e PB/Mil_{100} , o que mostra o pau-branco mais tolerante à seca do que o milho, que apresentou tendência à redução em g_s , A e E conforme o estresse foi tornando-se crônico.

A massa seca total (MST) do pau-branco não diferiu ($p > 0,05$) entre tratamentos na C1, mas foi maior naqueles com umidade do solo a 100% da CC na C2. Apenas PB_{100} e PB/Mil_{100} tiveram aumento na MST entre C1 e C2 (Tabela 2.2). Para a área foliar (AF), o efeito da diferenciação da umidade foi perceptível logo na primeira coleta, quando PB_{100} e PB/Mil_{100} apresentaram maiores AF. Na C2, a AF foi maior em PB_{100} e menor em PB/Mil_{50} , que foi o único tratamento com redução na AF em relação a C1 (Tabela 2.2). Crescimento praticamente estagnado e acentuado declínio da biomassa total, além de perda de folhas, parada no crescimento e morte das plantas, são consequências do estresse hídrico severo (Li *et al.*, 2011). Asch *et al.* (2005) registraram que plantas em vasos com umidade mantida em 50% da capacidade de campo apresentaram massa seca total bem inferior à das plantas desenvolvidas na capacidade de campo. A redução na área foliar, como aconteceu

com o pau-branco nos tratamentos a 50% da capacidade de campo, em decorrência da abscisão de folhas maduras e da redução na expansão foliar, constitui-se como uma estratégia para manter o conteúdo relativo de água (Li *et al.*, 2011).

A massa seca total do milho foi reduzida em 54% e 59% entre os tratamentos com plantas em associação (Mil/PB₁₀₀ e Mil/PB₅₀) e isoladas (Mil₁₀₀ e Mil₅₀) na C1, respectivamente, não havendo diferenças em decorrência da condição de umidade do solo. Na C2, as maiores médias também foram registradas para os tratamentos Mil₁₀₀ e Mil₅₀ e houve redução na MST em 57% e 59% em Mil/PB₁₀₀ e Mil/PB₅₀, comparados aos respectivos tratamentos isolados, respectivamente, em decorrência da associação (Tabela 2.2).

A área foliar (AF) do milho também foi menor nos tratamentos Mil/PB₁₀₀ e Mil/PB₅₀ na C1 e houve aumento em todos os tratamentos entre C1 e C2, diferentemente do pau-branco (Tabela 2.2). Todavia, a média registrada para Mil₁₀₀ foi 100% maior que em Mil/PB₁₀₀ e cerca de duas vezes maior que a do Mil/PB₅₀, que apresentou a menor AF, o que, adicionalmente, indica um efeito da associação. Estudos relatam que o milho pode competir pelos recursos disponíveis e ser ou não a espécie prejudicada quanto à produção de massa seca, dependendo das condições ambientais e da espécie associada (Araújo *et al.*, 2011; Nassab *et al.*, 2011; Souza *et al.*, 2011).

A área foliar específica (AFE) foi semelhante entre os quatro tratamentos do pau-branco na C1 e na C2 e não houve diferença entre datas de coletas (Tabela 2.3). Para o milho houve aumento da AFE em função da associação e redução entre C1 e C2 (Tabela 2.3). Para as duas espécies o déficit hídrico, que comumente leva as plantas a apresentarem menor área foliar específica (Liu; Stützel, 2004), não promoveu diferenças entre os tratamentos. A diminuição na razão entre área foliar e massa seca aérea registrada para o milho entre C1 e C2 revelam que tais plantas investiram em massa seca, em detrimento de área foliar, ao longo do tempo, o que pode acontecer em função da idade das plantas (Oliveira *et al.*, 2000), cuja tendência é reduzir a taxa de aumento foliar para investir em produção de massa seca.

Tabela 2.2. Massa seca total (MST) e área foliar (AF) do pau-branco (*Cordia oncocalyx*) e do milho (*Zea mays*), isolados (PB; Mil) e associados (PB/Mil; Mil/PB), em umidade do solo a 100% e a 50% da capacidade de campo

Tratamento	Primeira coleta (C1)		Segunda coleta (C2)	
	MST (g)	AF (cm ²)	MST (g)	AF (cm ²)
Pau-branco (PB)				
PB ₁₀₀	24,51 ^{aB}	2.120,7 ^{aA}	35,46 ^{aA}	2.586,7 ^{aA}
PB ₅₀	20,96 ^{aA}	1.407,4 ^{bA}	21,85 ^{cA}	1.458,0 ^{bcA}
PB/Mil ₁₀₀	27,49 ^{aB}	2.302,2 ^{aA}	31,54 ^{bA}	1.781,6 ^{bA}
PB/Mil ₅₀	21,78 ^{aA}	1.474,7 ^{bA}	22,47 ^{cA}	889,3 ^{cB}
Milho (Mil)				
Mil ₁₀₀	6,22 ^{aB}	1.476,9 ^{aB}	14,23 ^{aA}	2.187,2 ^{aA}
Mil ₅₀	5,65 ^{aB}	1.298,4 ^{aB}	9,86 ^{bA}	1.698,4 ^{bA}
Mil/PB ₁₀₀	2,88 ^{bB}	678,3 ^{bB}	6,15 ^{cA}	1.334,7 ^{bcA}
Mil/PB ₅₀	2,30 ^{bB}	464,4 ^{bB}	4,08 ^{cA}	906,0 ^{cA}

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre os tratamentos e de letras maiúsculas iguais na linha não diferem entre coletas pelo teste de Tukey, $p > 0,05$ ($n = 5$).

A razão raiz/parte aérea (R/PA) foi maior em PB₅₀, PB/Mil₅₀, Mil/PB₁₀₀ e Mil/PB₅₀ na C1 (Tabela 2.3), evidenciando maior investimento em raízes com relação à parte aérea, para que haja manutenção ou aumento na captação de água (Díaz-López *et al.*, 2012). A associação e a umidade reduzida estimularam o desenvolvimento radicular do pau-branco, de forma que houve aumento na R/PA registrado para PB/Mil₁₀₀ e PB/Mil₅₀ da C1 para a C2. Para o milho, observa-se que, entre a primeira e a segunda coleta, o desenvolvimento da parte aérea tornou-se prioritário e que o investimento em parte aérea foi, no mínimo, três vezes maior do que no pau-branco. Situações de acesso reduzido à radiação solar decorrentes de sombreamento promovem aumentos no investimento em parte aérea em detrimento daquele da raiz, levando à redução da R/PA (Camara; Endres, 2008). Em experimento, Mushagalusa *et al.* (2008) observaram que plantas de milho em associação com plantas de batata competem por luz e que isso levou à redução na R/PA. Neste estudo, embora não tenha sido isolada a competição por luz, os resultados proveem evidências que tal situação tenha acontecido nas plantas de milho em associação com o pau-branco (Mil/PB₅₀ e Mil/PB₁₀₀), o que justifica tão

reduzido investimento em raiz no milho em comparação com o pau-branco ou com Mil₁₀₀.

Tabela 2.3. Área foliar específica (AFE), razão raiz/parte aérea (R/PA) e taxa de crescimento absoluto (TCA) do pau-branco (*Cordia oncocalyx*) e do milho (*Zea mays* L.), isolados (PB; Mil) e associados (PB/Mil; Mil/PB), em umidade do solo a 100% e a 50% da capacidade de campo

Tratamento	Primeira coleta (C1)		Segunda coleta (C2)		
	AFE (cm ² g ⁻¹)	R/PA (g g ⁻¹)	AFE (cm ² g ⁻¹)	R/PA (g g ⁻¹)	TCA (g d ⁻¹)
Pau-branco (PB)					
PB ₁₀₀	219,75 ^{aA}	0,483 ^{bA}	214,34 ^{aA}	0,555 ^{cA}	0,728 ^a
PB ₅₀	195,96 ^{aA}	0,652 ^{aA}	207,34 ^{aA}	0,723 ^{bA}	0,059 ^c
PB/Mil ₁₀₀	223,19 ^{aA}	0,455 ^{bB}	218,12 ^{aA}	0,779 ^{bA}	0,269 ^b
PB/Mil ₅₀	210,08 ^{aA}	0,684 ^{aB}	207,01 ^{aA}	0,957 ^{aA}	0,046 ^c
Milho (Mil)					
Mil ₁₀₀	460,77 ^{bA}	0,329 ^{cA}	358,66 ^{bB}	0,342 ^{aA}	0,534 ^a
Mil ₅₀	445,48 ^{bA}	0,323 ^{cA}	358,92 ^{bB}	0,190 ^{bB}	0,282 ^b
Mil/PB ₁₀₀	509,90 ^{aA}	0,574 ^{bA}	438,87 ^{aB}	0,209 ^{bB}	0,218 ^b
Mil/PB ₅₀	557,90 ^{aA}	1,085 ^{aA}	441,55 ^{aB}	0,229 ^{bB}	0,119 ^c

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre os tratamentos e de letras maiúsculas iguais não diferem entre coletas pelo teste de Tukey, $p > 0,05$ ($n = 5$).

A associação e o nível de umidade do solo afetaram a taxa de crescimento absoluto (TCA) do pau-branco e do milho e levaram os tratamentos PB/Mil₅₀ e Mil/PB₅₀ a apresentarem as menores médias (Tabela 2.3). O pau-branco e o milho associados em umidade do solo a 50% da capacidade de campo apresentaram na C2 taxas de crescimento absoluto 22 e 58% menores do que isolados no mesmo nível de umidade, respectivamente, mostrando que na associação o milho foi mais prejudicado que o pau-branco.

4 CONCLUSÕES

As plantas de pau-branco não apresentam alterações fisiológicas em função da associação e, assim, o desenvolvimento é pouco alterado, enquanto o nível reduzido de umidade do solo afeta negativamente as trocas gasosas (*A*, *g*s e *E*), levando a reduções na produção de massa seca. O milho é fisiologicamente

alterado principalmente pelo nível de umidade do solo, enquanto a massa seca e a área foliar evidenciam alterações decorrentes tanto do nível de umidade quanto da associação. Dessa forma, o milho e o pau-branco competem por água tanto a 100% quanto a 50% da capacidade de campo, todavia o milho é a espécie prejudicada pela associação.

REFERÊNCIAS

Aguiar, M.I.; Maia, S.M.; Oliveira, T.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J.A., 2006. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. *Revista Ciência Agronômica*, 37:270-278.

Araújo, L.C.; Santos, P.M.; Mendonça, F.C.; Lima, N.R.C.D., 2011. Development of maize and palisadegrass plants cultivated in intercrop under water deficit. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 40:1397-1404.

Asch, F.; Dingkuhn, M.; Sow, A.; Audebert, A., 2005. Drought-induced changes in rooting patterns and assimilate partitioning between root and shoot in upland rice. *Field Crops Research*, 93:223-236.

Barradas, V.L.; Nicolás, E.; Torrecillas, A.; Alarcón, J.J., 2005. Transpiration and canopy conductance in young apricot (*Prunus armenica* L.) trees subjected to different PAR levels and water stress. *Agricultural Water Management*, 77:323-333.

Camara, C.A.; Endres, L., 2008. Desenvolvimento de mudas de duas espécies arbóreas: *Mimosa caesalpinifolia* Benth. E *Sterculia foetida* L. sob diferentes níveis de sombreamento em viveiro. *Floresta*, 38:43-51.

Campanha, M.M.; Araujo, F.S.; Menezes, M.O.T.; Silva, V.M.A; Medeiros, H.R., 2011. Estrutura da comunidade vegetal arbóreo-arbustiva de um sistema agrossilvipastoril, em Sobral-CE. *Revista Caatinga*, 24:94-101.

Cannel, M.G.R.; van Noordwijk, M.; Ong, C.K., 1996. The central agroforestry hypothesis: the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire. *Agroforestry Systems*, 34:27-31.

Conselho de Informações Biotecnológicas – CIB. 2012. Guia do milho: tecnologia do campo à mesa. Disponível: <http://www.cib.org.br/pdf/guia_do_milho_CIB.pdf>. Acesso em: 31/05/2012.

Costa, G.S.; Franco, A.A.; Damasceno, R.N.; Faria, S.M., 2004. Aporte de nutrientes pela serapilheira em uma área degradada e revegetada com leguminosas arbóreas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28:919-927.

Díaz-López, L.; Gimeno, V.; Simón, I.; Martínez, V.; Rodríguez-Ortega, W.M.; García-Sánchez, F., 2012. *Jatropha curcas* seedlings show a water conservation strategy under drought conditions based on decreasing leaf growth and stomatal conductance. *Agricultural Water Management*, 105:48-56.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, 1997. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura. 212p.

Gao, Y.; Duan, A.; Sun, J.; Li, F.; Liu, Z.; Liu, H.; Liu, Z., 2009. Crop coefficient and water-use efficiency of winter wheat/spring maize strip intercropping. *Field Crops Research*, 111:65-73.

Heineman, A.M.; Otieno, H.J.O.; Mengich, E.K.; Amadalo, B.A., 1997. Growth and yield of eight agroforestry tree species in line plantings in Western Kenya and their effect on maize yields and soil properties. *Forest Ecology and Management*, 91:103-135.

Kakani, V.G.; Vu, J.C.V.; Allen-JR., L.H.; Boote, K.J., 2009. Competition between maize and pigeonpea in semi-arid Tanzania: Effect on yields and nutrition of crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 134:115-125.

Li, F.-M.; Liu, X.-L.; Li, S.-Q., 2001. Effects of early soil water distribution on the dry matter partition between roots and shoots of winter wheat. *Agricultural Water Management*, 49:163-171.

Li, F.-L.; Wei-Kai, B.; Ning, W., 2011. Morphological, anatomical and physiological responses of *Campylotropis polyantha* (Franch.) Schindl. seedlings to progressive water stress. *Scientia Horticulturae*, 127:436-443.

Liu, F.; Stützel, H., 2004. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. *Scientia Horticulturae*, 102:15-27.

Lott, J.E.; Khan, A.A.H.; Black, C.R.; Ong, C.K., 2003. Water use in a *Grevillea robusta*–maize overstorey agroforestry system in semi-arid Kenya. *Forest Ecology and Management*, 180:45-59.

Makumba, M.; Janssen, B.; Oenema, O.; Akinnifesi, F.K.; Mweta, D.; Kwesiga, F., 2006. The long-term effects of a gliricidia–maize intercropping system in Southern Malawi, on gliricidia and maize yields, and soil properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 116:85-92.

Mendes, M.M.S.; Lacerda, C.F.; Cavalcante, A.C.R.; Fernandes, F.E.P.; Oliveira, T.S., 2013. Desenvolvimento do milho sob influência de árvores de pau-branco em sistema agroflorestal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48:xxx-xxx.

Mcintyre, B.D.; Riha, S.J.; Ong, C.K., 1997. Competition for water in a hedge-intercrop system. *Field Crops Research*, 52:151-160.

- Mushagalusa, N.G.; Ledent, J.-F.; Draye, X., 2008. Shoot and root competition in potato/maize intercropping: effects on growth and yield. *Environmental and Experimental Botany*, 64:180-188.
- Muthuri, C.W.; Ong, C.K.; Craigon, J.; Mati, B.M.; Ngumi, V.W.; Black, C.R., 2009. Gas exchange and water use efficiency of trees and maize in agroforestry systems in semi-arid Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 129:497-507.
- Nassab, A.D.D.M.; Amon, T.; Kaul, H.-P., 2011. Competition and yield in intercrops of maize and sunflower for biogas. *Industrial Crops and Products*, 34:1203-1211.
- Novák, V.; Hortalová, T.; Matejka, F., 2005. Predicting effects of soil water content and soil water potential on transpirations of maize. *Agricultural Water Management*, 76:211-223.
- Oliveira, M.A.; Odilon, G.P.; Gomide, J.A.; Huaman, C.A.; Garcia, R.; Cecon, P.R., 2000. Análise de crescimento do capim-bermuda 'Tifton-85' (*Cynodon* sp.). *Revista Brasileira de Zootecnia*, 29:1930-1938.
- Silva, G.L.; Lima, H.V.; Campanha, M.M.; Gilkes, R.J.; Oliveira, T.S., 2011. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in Brazilian semi-arid region. *Geoderma*, 167-168:61-70.
- Souza, L.S.B.; Moura, M.S.B.; Sedyama, G.C.; Silva, T.G.F., 2011. Eficiência do uso da água das culturas do milho e do feijão-caupi sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado no semiárido brasileiro. *Bragantia*, 70:715-721.
- Wu, Y.; Huang, M.; Warrington, D.N., 2011. Growth and transpiration of maize and winter wheat in response to water deficits in pots and plots. *Environmental and Experimental Botany*, 71:65-71.

CAPÍTULO 3

(Enviado para a revista Brazilian Journal of Plant Physiology)

ECOPHYSIOLOGY OF A WOODY PLANT IN AGROSILVOPASTORAL SYSTEM AND SECOND FOREST IN THE BRAZILIAN SEMIARID

Abstract – Studies on the effect of clearing and of the kind of plantation on trees are scarce and little is known about physiological alterations in native trees in an agroforest compared to trees in the original forest. We aimed at testing for physiological differences in *Cordia oncocalyx* trees in two environments: agroforest system (AGP) and second forest (SF). We assessed photosynthesis (A), stomatal conductance (g_s), transpiration (E), water use efficiency (WUE), moisture content in the leaves and soil, and chlorophyll content, in the rainy and the dry seasons in apical and basal leaves. We quantified the dry mass of leaves and fruits per tree in each area at the end of the rainy season, before the beginning of leaf fall. Photosynthesis was higher in basal leaves in the AGP in the rainy season and in the SF in the dry season. The gas exchange in the apical leaves in the AGP were more intense and there was higher percentage of water in leaves in the dry season, despite the lower gravimetric content of water in the soil of this system. The dry mass of leaves and fruits per tree was higher in the AGP than in the SF. The physiological differences in basal leaves between systems in the dry season may be explained by variations in sunlight incidence. As there was no difference in sunlight incidence in the apical leaves between systems, thus the highest values of A , g_s , and E in the apical leaves of AGP at dry season seem to be related to morphological or anatomical differences.

Keywords: *Cordia oncocalyx*. Leaf gas exchange. Chlorophyll content. Dry mass.

1 INTRODUCTION

With the growing human population in the world, the demand for new areas for agriculture or livestock is also growing, leading to an increase in deforestation. In face of the unsustainability of conventional and traditional farming, alternative management regimes have been proposed, among them agroforestry

systems, such as silvopastoral, silvicultural, and agrosilvopastoral systems. The agroforestry systems propose to ally tree preservation with agriculture and livestock.

According to Brocque *et al.* (2009), maintaining trees in pasture lands provides significant heterogeneity and important refuges for species that could be excluded in open habitats. Similarly, an open canopy or forest gaps promote higher colonization by native species than dense canopies (Lemenih *et al.*, 2004; Taylor *et al.*, 2004). Hence agroforestry systems would be an intermediate alternative between forest and monoculture, as they are able to provide higher diversity and stability.

Compared to traditional cultures, agroforestry systems increase the litter, input and cycling of nutrients, decrease runoff, and increase water infiltration in the soil (Cannavo *et al.*, 2011; Nair *et al.*, 2008). Compared to native forests, they may have higher surface runoff, nutrient and sediment loss, as well as lower content of organic carbon and particulate organic matter in the soil (Maia *et al.*, 2007; Maia *et al.*, 2008; McDonald *et al.*, 2002). However, comparative studies between agroforestry systems and native forests are scarce and focus only on environmental conditions.

In Brazil, studies on agroforests have been carried out mainly in the Amazon and Atlantic Forest, and focuses on coffee (Souza *et al.*, 2012), cacao (Moço *et al.*, 2010), cupuaçu, and pupunha plantations (Alfaia *et al.*, 2004). In the Brazilian semiarid region, the studies have focused mainly on corn plantations and pastures, and investigated aspects such as physical quality of the soil (Silva *et al.*, 2011), floristic and phytosociology (Campanha *et al.*, 2011), water and nutrient loss (Aguiar *et al.*, 2010), nutrient dynamics, and microclimate (Menezes *et al.*, 2002; Maia *et al.*, 2008), but there is no information on plant ecophysiology.

In northeastern Brazil, where predominates the Caatinga (Brazilian woody savanna), rain distribution is irregular, and temperatures are high. Hence, traditional agriculture is limited to the short rainy season and is usually made itinerantly, with slash-and-burn of the forest, cultivation and finally abandonment of the area (IBGE, 2006). Given these climatic characteristics and agricultural practices that are common in the region, the implementation of agroforestry systems may be an alternative to the clearing and abandonment of the land.

Studies on the effect of clearing and of the kind of plantation on trees are scarce and little is known about physiological alterations in native trees in an agroforest compared to trees in the original forest. It is possible that tree height and biomass are reduced after the implementation of an agroforestry system (Lott *et al.*, 2000), as well as high tree density, as observed in forests, may interfere in tree biomass (Singh *et al.*, 2007). Hence, it is important to understand how the management regime of an agroforestry system may influence physiological processes of trees that, ultimately, will be reflected in the productivity of the trees and the system as a whole.

Observations made in experimental areas of Sobral, Ceará, northeastern Brazil, evidenced that trees have different periods of total leaf abscission between an agrosilvopastoral system and a forest. Based on this observation, we hypothesized that management regimes such as those of agrosilvopastoral systems increase gas exchange and biomass of trees in comparison with the forest. Hence, we aimed at knowing which physiological differences occur in *Cordia oncocalyx* trees, a common native species with broad distribution in the Brazilian semiarid region (Carvalho, 2008), between these two types of environments, which could set the ground for choosing agroforests in other semiarid regions.

2 MATERIAL AND METHODS

2.1 Study areas

The study areas are located at Crioula Farm, within the National Research Center of Goats and Sheep belonging to EMBRAPA, Sobral, Ceará, northeastern Brazil (Figure 3.1). The site is in the semiarid region of Ceará (3° 41' S and 40° 20' W), at 70 m a.s.l., with a slope between 3 and 20%. The average annual temperature is 30 °C and the average annual rainfall is 821 mm, concentrated from February to May. The soils are Orthic Chromic Luvisol and typical Orthic Hypochromic Luvisol (Aguiar *et al.*, 2006). Rainfall during the study is presented in Figure 3.2. The predominant vegetation in the area is Caatinga (woody savanna; Woodward *et al.*, 2004), which consists mostly of deciduous species that lose their leaves during the dry season that occurs from June to January. A long-term experiment has been

carried out in the area since 1997 to evaluate agroforestry as an alternative to traditional and conventional agricultural systems of the region. Among the systems assessed in the experiment developed by EMBRAPA are: traditional culture systems, agrosilvopastoral and silvopastoral systems, and second forest used as control. We selected two of these systems for the present study:

- Agrosilvopastoral system (AGP): an area of 1.6 ha cultivated in alleys, in 3.0-m wide bands, where maize (*Zea mays* L.) or sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) are cultivated, interpolated by rows of leucaena [*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit], with a space of 0.5 m between plants. This system consists of approximately 200 trees per hectare, corresponding to 22% of the soil cover. There is no use of fertilizers and the whole management is manual. Animals access the area to feed after harvesting the crop.
- Second forest (SF): corresponds to an area of 1.6 ha of arboreous Caatinga, with a secondary vegetation that is approximately 50 years old.

The two areas have nine tree species in total, and four in common: *Cordia oncocalyx* Allemão, *Mimosa caesalpinifolia* Benth., *Poincianella bracteosa* (Tul.) L.P. Queiroz, and *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud. (Campanha *et al.*, 2011).

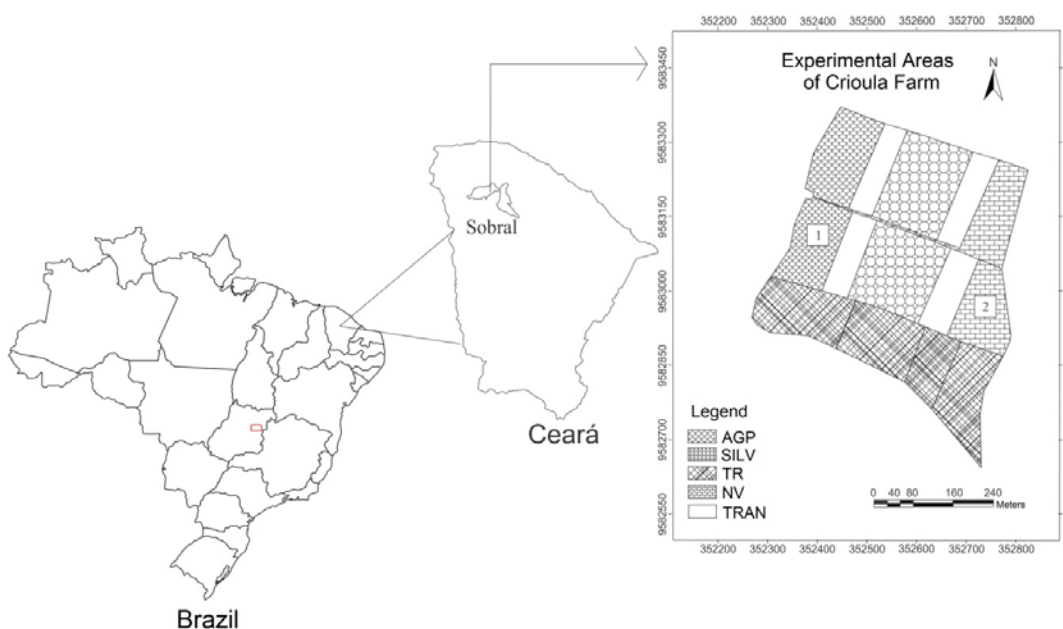


Figure 3.1. Map showing the experimental areas of National Research Center of Goats and Sheep, Crioula Farm, Sobral, Ceará, Brazil. AGP – agrosilvopastoral system, SILV – silvopastoral system, TR – traditional culture, NV – second forest and TRAN – transition zones. Numbers (1 and 2) correspond to our study sites. Source: adapted from Campanha *et al.* (2009).

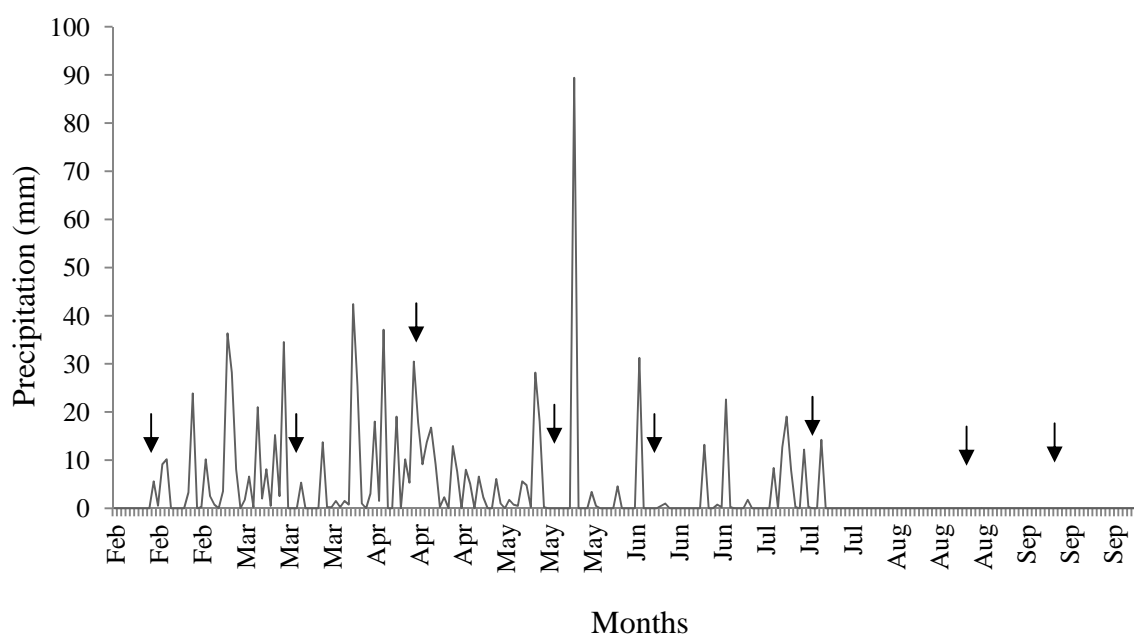


Figure 3.2. Daily rainfall in areas of National Research Center of Goats and Sheep, at Crioula Farm, from February-September 2011. Arrows indicate the days of collection of physiological data. Data source: meteorological stations installed in both systems.

2.2 Studied species

We chose *Cordia oncocalyx* Allemão (locally known as 'pau-branco'), Boraginaceae, due to its high frequency (49.1% in the SF and 50% in the AGP; Campanha *et al.*, 2008) and because it shows full leaf abscission in different periods in the studied environments. *C. oncocalyx* trees are deciduous and reach up to 12 m in height, emitting leaves and flowering at the beginning of the rainy season (January/February). Fruiting starts next (March) and the fruits remain until the beginning of the dry season (July/August), when the plants lose their leaves. The trees are tillered in the SF and present a single trunk in the AGP. The abundance of *C. oncocalyx* is of 670 individuals per hectare in the SF and of 80 individuals per hectare in the AGP (Aguar *et al.* in press).

2.3 Water content in the soil and plants

To measure the gravimetric water content in the soil, we collected, in April (rainy season) and September (dry season), three samples at the depths 0-10, 10-20, 20-40, and 40-60 cm, following the protocol of EMBRAPA (1997). To measure the water content in leaves, we collected, with a trimmer, five samples of apical

branches, at approximately 4 m height, in each environment, from February to September. We weighed all material immediately after collection to avoid water loss. Both soil and plant samples were dried in an oven at 65 °C for leaves and 105 °C for soil and then weighed it again to obtain the dry weight. With these data, we calculated the percentage of water in the leaves and soil.

2.4 Physiological assessments

Physiological data of the rainy season, from February to July, were pooled and separated from those of the dry season, August and September, referred here as 30 and 50 days after the last rain, respectively.

Photosynthesis (A), stomatal conductance (g_s), transpiration (E), leaf-to-air vapor pressure deficit ($VPD_{\text{leaf-to-air}}$), leaf temperature (T_{leaf}), and photosynthetically active radiation that reaches the leaf (PAR_o) were recorded with an infrared gas meter (LI-6400XT, LI-COR Biosciences, USA). The water use efficiency (WUE) was calculated as a ratio between photosynthesis and transpiration.

Leaves from the apex of the canopy (sun leaves, apical), between eight and nine meters height, and from the base of the canopy (shade leaves, basal) were used, taking three leaves per plant, and three trees per system. We differentiated apical and basal leaves by morphology, following Lichtenthaler *et al.* (2007): basal leaves are larger, longer and more membranaceous than apical leaves. To reach the apical leaves, we assembled three scaffold towers in each system, one per tree, with height similar to that of the plants.

We carried out records on basal and apical leaves between 9:00 and 10:00 from February to September, one day per month. For assessing the daily cycle of gas exchange in apical leaves, we added records at the times: 7:00 – 8:00, 12:00 – 13:00, and 15:00 – 16:00, from May to September.

The chlorophyll content (SPAD index) in the leaf blade was measured with a portable device (SPAD-502P, Minolta, Japan) that measures the intensity of the green color on the leaf. The results of this device are well correlated with the total concentration of leaf chlorophyll obtained through destructive methods (Hawkins *et al.*, 2009). The data are composed of an average of three measurements per leaf,

three leaves per tree, and from three plants in the AGP and in the SF, including both apical and basal leaves.

2.5 *Dry mass production*

To measure total fresh mass (TFM, kg tree^{-1}) we collected and weighed all leaves, separating them into apical and basal leaves, as well as fruits of three trees in each area, in July. We separated three samples of leaves and three of fruits per tree and weighed them to measure the fresh mass. Next, we dried them to constant weight in an oven at 65 °C to measure the dry mass. We used these data to calculate the percentage of dry mass (PDM, %), $(\text{DMs} \times 100)/\text{FMs}$, where DMs is the dry mass of the sample and FMs is the fresh mass of the sample, both in grams.

For the calculation of the total dry mass (TDM, kg tree^{-1}), we multiplied the values of total fresh mass per tree (TFM) by the PDM.

2.6 *Statistical analysis*

We made an analysis of variance followed by a Tukey test ($\alpha = 5\%$) to test for differences between seasons (rainy season, 30, and 50 days after the last rain) and environments (AGP and SF) in T_{leaf} , $\text{VPD}_{\text{leaf-to-air}}$, PAR, gas exchange, and water use efficiency of basal leaves. Other data were analyzed only descriptively (mean \pm S.E.). Plots were built in Microcal Origin™ (1997).

3 RESULTS

3.1 *Water content in the soil and plants*

The gravimetric moisture in the soil in April differed between systems only at 10 cm depth, whereas in September, dry season, it was lower in the AGP at all depths assessed (Figure 3.3A-B). The water content in leaves tended to be lower in the AGP, but no difference was found in most months. In September, 50 days after the last rain, we observed an inversion, with higher water content in the leaves of the AGP than in those of the SF (Figure 3.4).

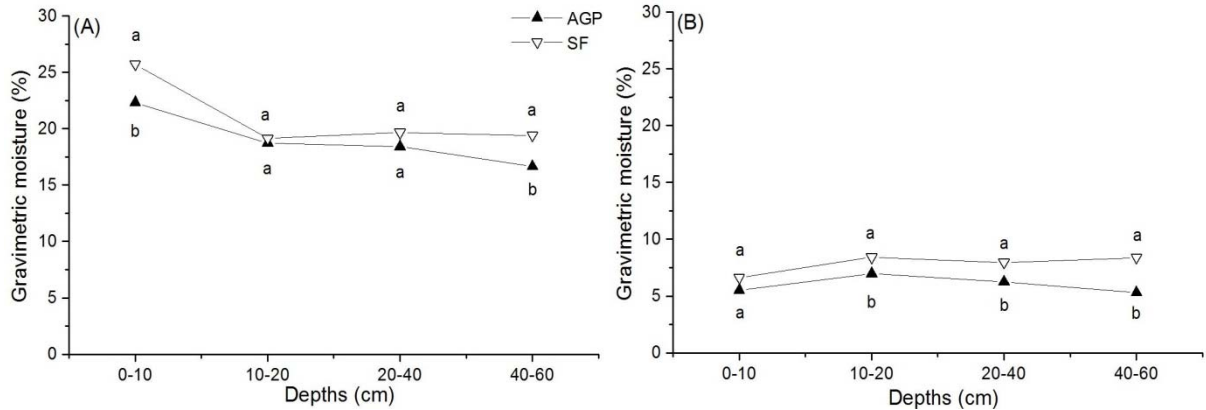


Figure 3.3. Gravimetric moisture in the soil in April (A) and September (B), at four depths, in an agrosilvopastoral system (AGP) and in the second forest (SF) (n = 3). Different lowercase letters indicate significant differences (p < 0.05) between environments (Tukey test).

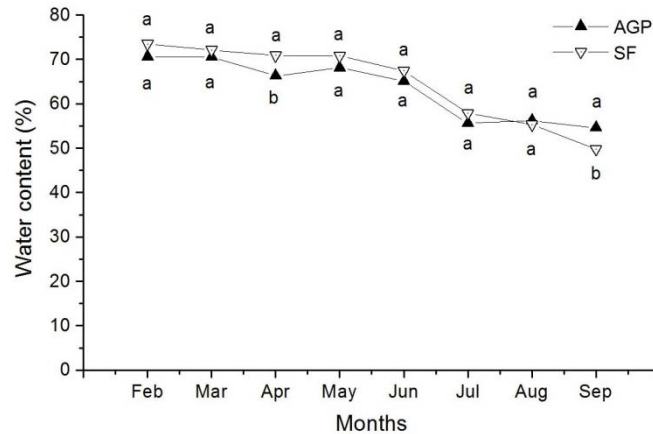


Figure 3.4. Water content in apical leaves of *Cordia oncocalyx* in an agrosilvopastoral system (AGP) and in the second forest (SF) (n = 5). Different lowercase letters indicate significant differences (p < 0.05) between environments (Tukey test).

3.2 Leaf temperature, photosynthetically active radiation, and vapor pressure deficit

The temperature (T_{leaf}) of apical leaves was higher in the SF than in the AGP in the dry season, both at 30 and 50 days after the last rain, whereas in the basal leaves there was a difference between systems only at 50 days after the last rain (Table 3.1). T_{leaf} increased between seasons only in the basal leaves of *C. oncocalyx*. There was a difference in photosynthetically active radiation (PAR) between systems only in the basal leaves, but the increase that occurred from the rainy season until 50 days after the last rain was of 77% in the AGP, and above twenty-times in the SF (Table 3.1). We recorded the highest variations in $VPD_{leaf-to-air}$ in the basal leaves between the rainy and dry seasons, with 100% higher values in the AGP and almost 200% higher values in the SF. There was a difference between

systems only at 50 days after the last rain, both in basal and apical leaves, which was higher in the SF (Table 3.1).

Table 3.1. Leaf temperature (T_{leaf}), photosynthetically active radiation (PAR), and leaf-to-air vapor pressure deficit ($\text{VPD}_{\text{leaf-to-air}}$) of apical leaves of *Cordia oncocalyx* at 9:00 and of basal leaves at 12:00, in an agrosilvopastoral system (AGP) and in the second forest (SF) in the rainy and dry seasons

Season	T_{leaf} ($^{\circ}\text{C}$)		PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		$\text{VPD}_{\text{(leaf-to-air)}}$ (KPa)	
	AGP	SF	AGP	SF	AGP	SF
-----Apical leaves -----						
Rainy season	33.27 _{aA}	33.54 _{aA}	1231.75 _{aA}	913.77 _{bA}	2.76 _{aA}	2.64 _{bA}
30 days	33.83 _{aB}	35.12 _{aA}	1741.82 _{aA}	1829.67 _{aA}	3.16 _{aA}	3.74 _{aA}
50 days	32.45 _{aB}	35.76 _{aA}	1702.36 _{aA}	1573.72 _{aA}	2.79 _{aB}	4.04 _{aA}
-----Basal leaves -----						
Rainy season	32.74 _{bA}	32.28 _{aA}	62.09 _{aA}	38.52 _{cA}	2.61 _{bA}	2.46 _{aA}
30 days	38.59 _{aA}	39.34 _{bA}	69.92 _{aB}	189.02 _{bA}	5.14 _{aA}	5.64 _{bA}
50 days	39.90 _{aB}	41.83 _{cA}	109.91 _{aB}	863.65 _{aA}	5.86 _{aB}	6.70 _{cA}

Different lowercase letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between periods and uppercase letters indicate differences between environments (Tukey test). Rainy season = average values from February to July ($n = 54$); 30 days = 30 days after the last rain, August, dry season ($n = 9$); 50 days = 50 days after the last rain, September, dry season ($n = 9$).

3.3 Gas exchange and water use efficiency in basal leaves

The basal leaves of *C. oncocalyx* exhibited higher net photosynthesis in the AGP in the rainy season. From August this situation was inverted, and the leaves of the SF exhibited higher photosynthesis at 50 days after the last rain. Conversely, stomatal conductance and transpiration exhibited higher average values in the AGP in the dry season, which led to a lower water use efficiency (WUE) in the plants of this system at 30 and 50 days after the last rain (Figure 3.5A-D).

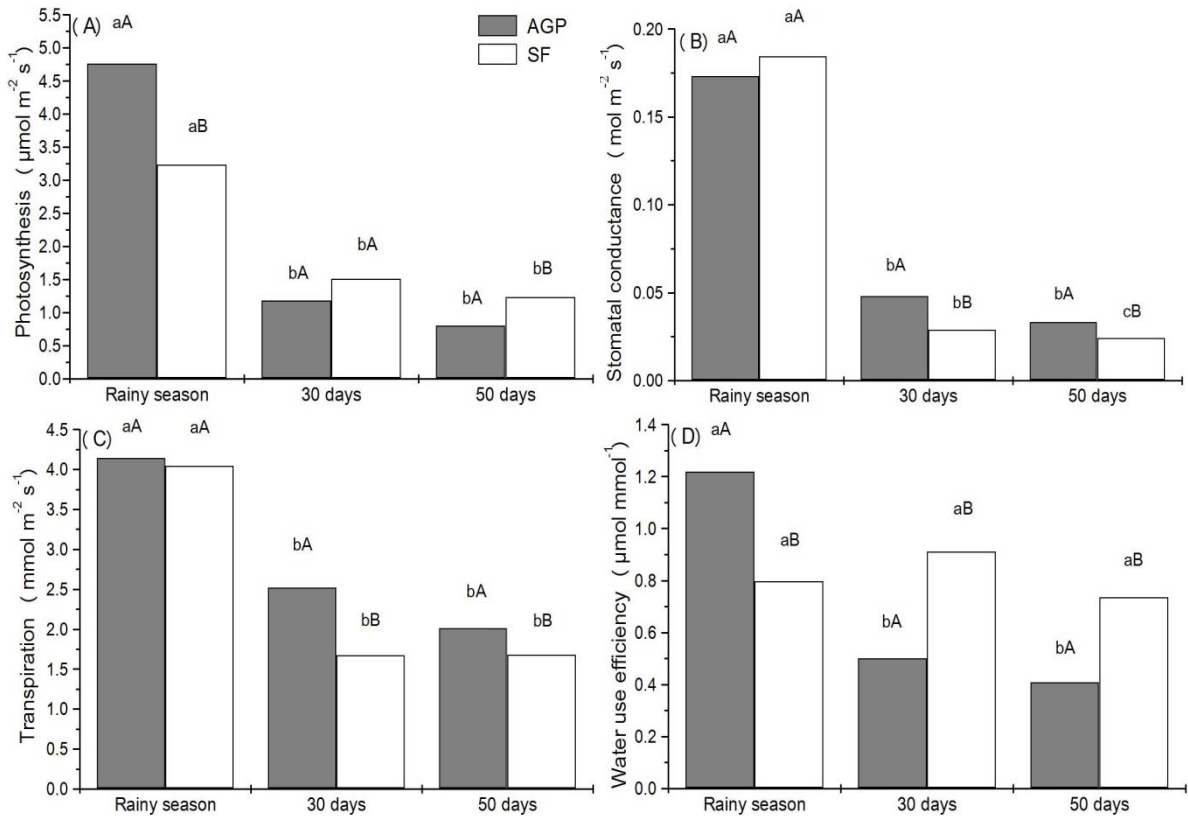


Figure 3.5. Photosynthesis (A), transpiration (B), conductance (C), and water use efficiency (D) in basal leaves of *Cordia oncocalyx* in an agrosilvopastoral system (AGP) and in second forest (SF). Lowercase letters indicate significant differences ($p > 0.05$) between seasons within the same system and uppercase letters indicate differences between environments in the same system (Tukey test). Rainy season = average values from February to July ($n = 54$); 30 days = 30 days after the last rain, August, dry season ($n = 9$); 50 days = 50 days after the last rain, September, dry season ($n = 9$; mean \pm S.E.).

3.4 Daily gas exchange and water use efficiency in apical leaves

Gas exchange was more intense in the rainy season and in the morning, decreasing from midday on. Photosynthesis was similar between systems in the rainy season, but from 30 days after the last rain on, CO_2 assimilation became higher in plants of the AGP during the whole day, and this difference increased at 50 days after the last rain (Figure 3.6A).

Stomatal conductance and transpiration differed between systems in the rainy season, and were higher in leaves of the SF: g_s from midday on and E from 9:00 on. However, in the dry season, these parameters maintained higher values in the AGP leaves at all times observed (Figure 3.6B and 3.6C). The g_s decreased in the afternoon at 30 and 50 days after the last rain (Figure 3.6B). However, despite a reduction in g_s at 15:00, E in plants of the AGP was similar to that recorded at 7:00 at

50 days after the last rain, while there was a slight reduction in E in plants of the SF at 15:00 in comparison with records at 7:00 (Figure 3.6C).

Water use efficiency in the rainy season decreased from 9:00 on. After this time, the systems started to differ from each other, and plants in the AGP exhibited higher WUE between 12:00 and 15:00. At 30 days after the last rain, WUE was more similar between systems, but it was still higher in the AGP from 7:00 to 12:00. The highest difference occurred at 50 days after the last rain, when at all times the highest averages were recorded in plants of the AGP (Figure 3.6D).

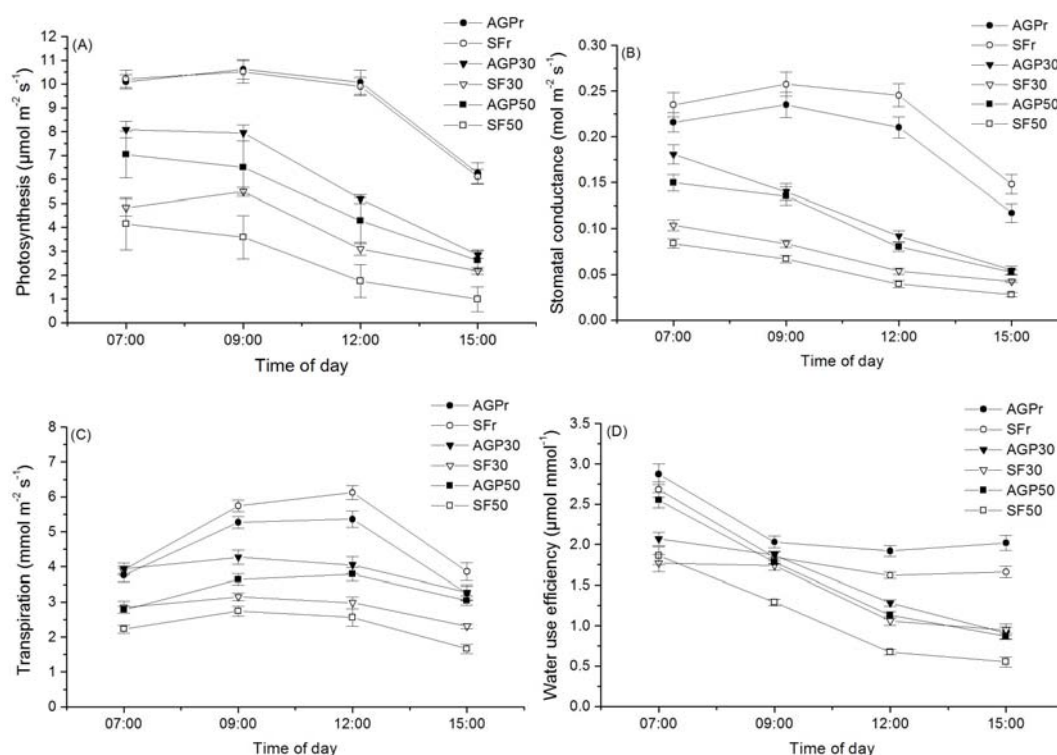


Figure 3.6. Photosynthesis (A), Stomatal conductance (B), Transpiration (C) and Water use efficiency (D) in apical leaves of *Cordia oncocalyx*, at 7:00, 9:00, 12:00, and 15:00, in an agrosilvopastoral system (AGP) and in second forest (SF). AGPr and SFr = rainy season, average values from February to July ($n = 54$); AGP30 and SF30 = 30 days after the last rain, August, dry season ($n = 9$); AGP50 and SF50 = 50 days after the last rain, September, dry season ($n = 9$; mean \pm S.E.).

The daily trend of leaf-to-air vapor pressure deficit (Figure 3.7), contrarily to g_s and A , showed a progressive increase after the first hours of the day in both systems in the dry season. At midday and 15:00, we recorded the highest values of $\text{VPD}_{\text{leaf-to-air}}$ in all periods. In the rainy season was no differences between AGP and SF at 7:00, 9:00 and at noon. At 30 days after the last rain the $\text{VPD}_{\text{leaf-to-air}}$ was different between AGP and SF at all times observed, however it was higher in AGP in

the evening. At 50 days after the last rain, $VPD_{\text{leaf-to-air}}$ was predominantly higher in plants of the SF, leading to less photosynthesis in this system than the AGP.

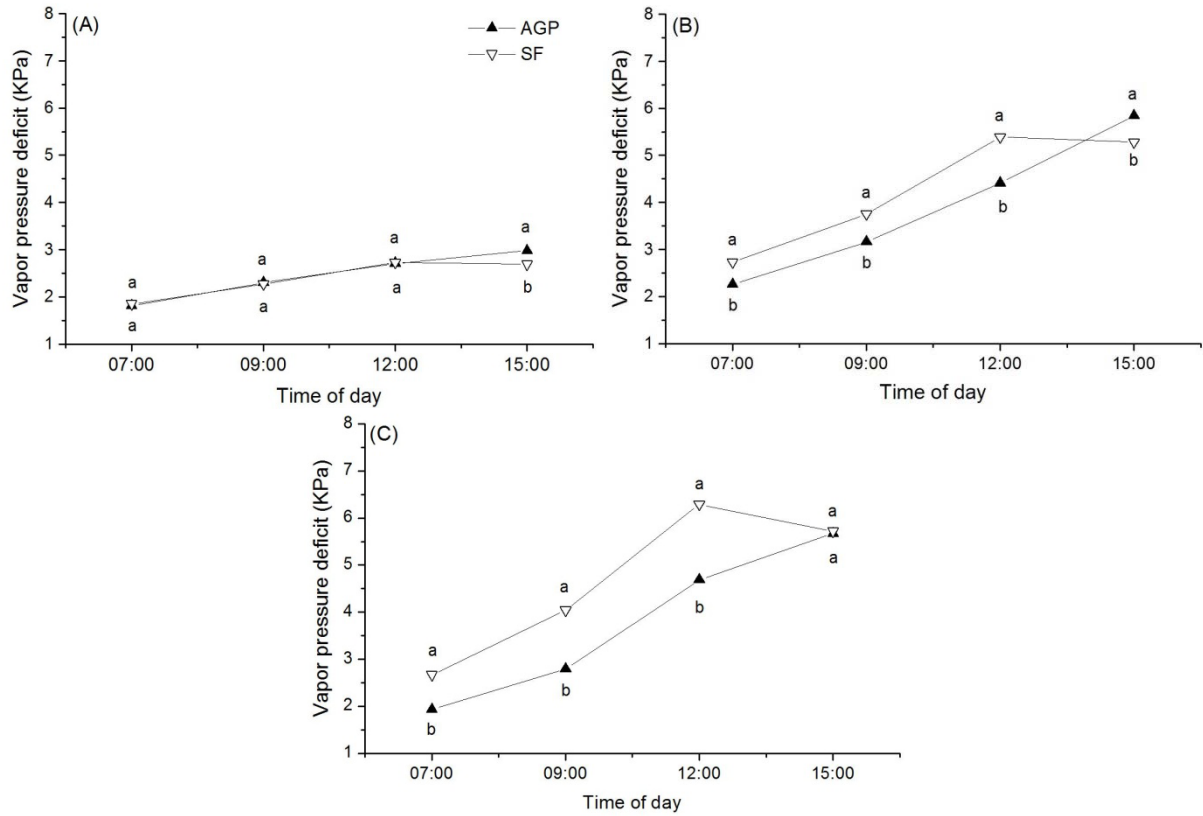


Figure 3.7. Leaf-to-air vapor pressure deficit in apical leaves of *Cordia oncocalyx*, at 7:00, 9:00, 12:00, and 15:00, in an agrosilvopastoral system (AGP) and in the second forest (SF). (A) Rainy season = average values from February to July ($n = 54$); (B) 30 days = 30 days after the last rain, August, dry season ($n = 9$); (C) 50 days = 50 days after the last rain, September, dry season ($n = 9$). Different lowercase letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between environments (Tukey test).

3.5 Chlorophyll

The chlorophyll content in basal leaves was higher in the AGP in all seasons. In SF there was a progressive decrease in the SPAD index between the rainy season and at 50 days after the last rain (Figure 3.8A). The chlorophyll content in apical leaves differed a lot between systems in the rainy season and at 50 days after the last rain; the AGP had the highest values (Figure 3.8B).

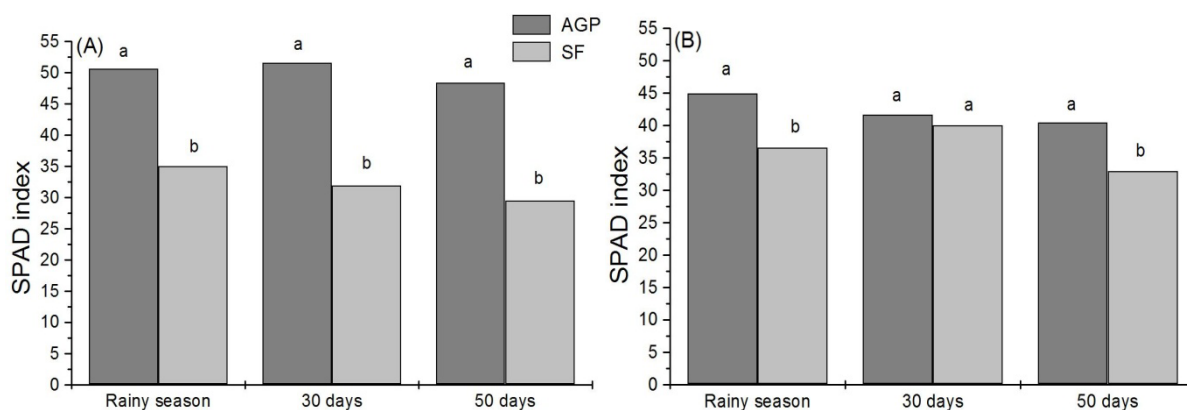


Figure 3.8. SPAD index of chlorophyll content in basal (A) and apical (B) leaves of *Cordia oncocalyx* in an agrosilvopastoral system (AGP) and in second forest (SF). Rainy season = average values from February to July ($n = 54$); 30 days = 30 days after the last rain, August, dry season ($n = 9$); 50 days = 50 days after the last rain, September, dry season. Different lowercase letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between environments (Tukey test).

3.6 Dry mass of *Cordia oncocalyx*

We recorded the highest production of total fresh mass in leaves and fruits in the AGP, with almost three-times more fresh mass per tree in AGP than in SF. The percentage of dry mass in fruits and basal leaves was also higher in this system, reaching almost 80% for fruits and 40% for leaves. The total average dry mass (pooling fruits and leaves) per plant was slightly higher than 4.0 kg tree^{-1} in the SF and above 20 kg tree^{-1} in the AGP (Table 3.2). Both in AGP and in SF, basal leaves contribute with a low proportion of total dry mass per tree (13.2 and 14.8%, respectively). Fruits of the trees in the AGP contribute about 35% of the total dry mass, whereas in the SF this percentage was only 7.6%, showing that fruit production is much higher in that system.

Table 3.2. Total fresh mass per tree (TFM), percentage of dry mass in samples (PDM), and total dry mass per tree (TDM) of *Cordia oncocalyx* in the second forest (SF) and in an agrosilvopastoral system (AGP) in July

	TFM (kg tree^{-1})		PDM (%)		TDM (kg tree^{-1})	
	SF	AGP	SF	AGP	SF	AGP
Apical leaves	8.63±1.23	23.07±0.18	42.16±2.64	45.77±1.53	3.63±0.86	10.55±0.68
Basal leaves	1.60±0.21	7.00±2.22	32.32±2.23	39.43±1.27	0.53±0.07	2.72±0.89
Fruits	0.54±0.10	9.33±2.07	63.87±4.02	79.28±2.83	0.34±0.11	7.33±1.44
Total	10.77±1.45	39.40±3.67	----	----	4.50±1.06	20.60±1.95

TFM and TDM: mean ± S.E., $n = 3$; PDM: mean ± S.E., $n = 9$.

4 DISCUSSION

In the rainy season, we recorded higher photosynthesis in basal leaves of the AGP than in the SF (Figure 3.5A), even though PAR, T_{leaf} and $\text{VPD}_{\text{leaf-to-air}}$ (Table 3.1), and g_s were similar in both systems. At 30 days after the last rain, the beginning of leaf fall enabled a more intense contact of the radiation with basal leaves in the SF, increasing A in this system, even though T_{leaf} and $\text{VPD}_{\text{leaf-to-air}}$ were still similar in both systems. At 50 days after the last rain, a lower $\text{VPD}_{\text{leaf-to-air}}$ in basal leaves of the AGP led to higher stomatal opening, which did not translate, though, in higher photosynthesis. On the contrary, Egea *et al.* (2011) stated that A increases in accordance with g_s , whereas Turner and Thomas (1998) emphasized that both are affected by the photon flux density. Hence, although leaf humidity allowed the maintenance of stomatal opening, the reduced incidence of solar radiation affected the photochemical phase, reducing net photosynthesis in basal leaves of the AGP. Rodrigues *et al.* (2011) observed reduction in photosynthesis, stomatal conductance, and transpiration, as well as in soluble carbohydrates, free amino acids, and total protein, in *Jatropha curcas*, when there was a decrease in PAR, despite high water availability in the soil.

Gas exchange differed between basal (shade leaves) and apical leaves (sun leaves) (Figure 3.6A-C) due to a direct influence of exposure level and to a lower absorption of radiation by shade leaves or, alternatively, due to an indirect effect of light that increased the number of stomata (Dai *et al.*, 2009). However, shade leaves exert an important compensation function by taking advantage of the weak radiation that reaches them (Larcher, 2006), thus, they are able to assure CO_2 fixation in situations that promote stomatal closure of apical leaves.

Photosynthesis in apical leaves was similar in both systems in the rainy season (Figure 3.6A). In this season, the water content in the soil was not a limiting factor to the development of plants, so A was high. After the period of high water availability, the soil begins to dry, and both temperature and air vapor pressure deficit increase, creating adverse conditions to gas exchange (D'Ambrosio *et al.*, 2006; Mahouachi, 2009). Nevertheless, the water content in the soil can be retained longer in forests than in an agroforest due to a higher density of plants, lower surface runoff,

and higher porosity (Eastham *et al.*, 1988; McDonald *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2011). Hence, it is probable that the higher density of trees in the SF was the main factor responsible for the maintenance of higher water content in soil this system than in the AGP at 50 days after the last rain.

At 50 days after the last rain, when the soil of the AGP had lower water content than in the SF (Figure 3.3), higher water content in the leaves (Figure 3.4) allowed higher transpiration in apical leaves of *C. oncocalyx* in the AGP (Figure 3.6C). Water deficit in the soil may lead to anatomical alterations in plants, such as: increase in the adaxial epidermis, chlorophyll parenchyma (palisade and spongy), and trichome density (Guerfel *et al.*, 2009). Hence, plants in the AGP have probably invested in water storage structures, which may safeguard physiological processes at times when water availability in the soil is low (Holbrook, 1995).

In the dry season, g_s , A , E , and water content in leaves were higher in apical leaves of *C. oncocalyx* in the AGP, where water content in the soil was lower. In part, the high vapor pressure deficit in leaves of the SF explains the stomatal closure that happened at 50 days after the last rain, but not at 30 days after the last rain, when leaves in AGP and SF had similar $VPD_{\text{leaf-to-air}}$. Santos *et al.* (2013) observed higher photosynthesis in *Jatropha curcas* in a forest (semi-humid) than in a Caatinga area (semiarid) during the dry season, which was attributed to higher water content in the soil of this environment, where lower $VPD_{\text{leaf-to-air}}$ was recorded. With an increase in $VPD_{\text{leaf-to-air}}$, E increase, which promotes reduction in leaf water potential, leading to stomatal closure (Streck, 2003). In addition, stomatal conductance and photosynthesis are influenced by water stress, as the relative water content in the leaf decreases (Gindaba *et al.*, 2005). However, photosynthesis does not always depend on water content in the soil or on $VPD_{\text{leaf-to-air}}$ (Streck, 2003). This evidences that the different photosynthetic rates recorded in the AGP and SF were also influenced by factors related to the plant itself, which may differ among environments, due to differences in management regime, related for instance to nutrient content (Herppich *et al.*, 2002) and wood density, once gas exchange rates are influenced by the plants' water transport capacity and this depends on wood density (Stiller, 2009).

Differences in physiology and water storage capacity in tree species living in different environments may result from changes in wood density. According to Wright *et al.* (2007), there is a positive correlation between wood density and leaf longevity. Trees with low wood density have higher water storage capacity and seem to balance well the water loss in leaves during the dry season (Maes *et al.*, 2009). According to Lima and Rodal (2010), these trees tend to produce leaves in the dry season, whereas trees with high wood density produce leaves only in the beginning of the rainy season, as observed in *C. oncocalyx*, which, according to Carvalho (2008), has moderately dense wood (0.70 g cm^{-3}). Chapotin *et al.* (2006) confirmed that leaf emission in the dry season in tree species of the genus *Adansonia* L. was almost entirely dependent on the water stored in the stem, since the flow of xylem sap at the base and stomatal conductance were very low.

Nutrient content in the soil is also an issue to be analyzed in terms of differences in physiology and productivity. Plants growing in naturally or artificially fertile soils have higher chlorophyll content, photosynthesis, and aboveground biomass production as long as radiation is not limiting, independently of plant density (Groot; Saucier, 2008; Minotta; Pinzauti, 1996). At the same time, because plants growing in soils with low quantity of nutrients have lower chlorophyll concentration, their photosynthetic capacity and total biomass are reduced (Boussadia *et al.*, 2010).

Gas exchange and water use efficiency may also be affected by time of the day, season of the year, and age of leaves. In general, the processes related to carbon assimilation in *C. oncocalyx* were higher between 7:00 and 9:00, decreasing from midday on. However, the time when plants photosynthesize may vary among species, depending on inter- and intraspecific interactions and environmental conditions. Gijón *et al.* (2011) observed high photosynthesis in *Pistacia vera* between 8:00 and 16:00, but with variations that depended on phenophase and soil moisture. In *Prunus dulcis*, in the season of high water availability, photosynthesis varied from 8 to $14 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ between 9:00 and 17:00, when the net radiation was between 700 and $1,000 \text{ W m}^{-2}$, whereas in the period of severe water stress photosynthesis was higher (8 to $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) only between 13:00 and 15:00 (Romero and Botia, 2006). In *Tectona grandis*, photosynthesis was constant from 8:00 to 18:00, but varied with the degree of interference of neighbor plants, and was very low when

interference was strong (Dexiang *et al.*, 2008), which indicates that the distance of neighbor plants may be another factor that influences carbon assimilation.

In parallel with climatic conditions, gas exchange is also affected by leaf maturity. Deciduous plants decrease their physiological processes in the beginning of the dry season, when leaf abscission begins. At 50 days after the last rain, in the beginning of the dry season, *C. oncocalyx* were in process of leaf loss, which differed between systems. Muthuri *et al.* (2009) and Uemura *et al.* (2005) observed higher *A*, *E*, and WUE in mature young leaves and a decrease in these variables with leaf senescence. Plants in the SF exhibited lower chlorophyll content (Figure 3.8), were more yellowish than those in the AGP, and were more prone to fall. This is also relevant in terms of physiology, since chlorophyll is the pigment responsible for photon absorption.

Plants in the AGP exhibited higher chlorophyll content than in the SF during almost the whole study period. Guerfel *et al.* (2009) observed that shade plants exhibited higher chlorophyll content, which was attributed to the strategy developed by plants to increase the amount of pigment necessary to absorb radiation. Yet, the results on chlorophyll content obtained in the present study cannot be explained directly by incident radiation, as the radiation that reached basal leaves was similar between systems in the rainy season and higher in the SF in the dry season, and there was no difference between systems regarding apical leaves. On the other hand, indirectly, a longer exposure time to high radiation leads to light acclimatization, which induces modifications in leaf structure, with a production of thicker leaves with higher chlorophyll content (Robakowski *et al.*, 2004).

Interactions between species, such as competition, may also affect the production of dry mass (Kilpeläinen *et al.*, 2010). The high intercession among roots of neighbor trees and the shadow provided by a dense canopy make plants to invest more energy in competition than in growth, as shown by Gerhardt (1996). This suggests that due to lower tree density in the AGP, *C. oncocalyx* plants may be transferring more energy to increment their basal area, produce leaves and biomass of leaves and fruits. Studies by Campanha *et al.* (2011) confirmed that many tree individuals in the agrosilvopastoral system were classified in the diameter classes 18-

21 and 39-42 cm, which did not happen in the area of second forest, where most individuals were in the diameter class of 0-6 cm.

Net photosynthesis was different between systems, in the rainy season, only on the basal leaves, which represent the lowest proportion of the total dry mass of a tree. Nevertheless, the total dry mass of basal and apical leaves and fruits was higher in the AGP in the end of the rainy season (Table 3.2). One explanation for these results could be related to incident radiation. The quantity of PAR intercepted and absorbed by leaves plays an important role in biomass production, as well as the efficiency of converting light into chemical energy through photosynthesis. Hence, any factor that affects radiation interception (i.e.: stratification and canopy opening, tree density) will lead to a decrease in dry mass production, as it is linearly related to intercepted PAR (Akhter *et al.*, 2009; Maire *et al.*, 2012; Sing *et al.*, 2007). However, there was no difference in values of PAR between AGP and SF in the rainy season, both in basal and apical leaves, which indicates an interaction of factors on the productivity of plants.

Our findings suggest that *C. oncocalyx* plants in the AGP may have higher resistance to drought compared to those in the SF, because they are able to keep greener leaves, with higher chlorophyll content, and maintain higher rates of transpiration, stomatal conductance, and photosynthesis throughout the day in apical leaves, with higher water use efficiency and water content in leaves at 50 days after the last rain, in the dry season, when there was low gravimetric water content in this system. This fact may be explained by alterations caused by agroforestry management, such as low tree density, on nutrient availability and other soil properties.

REFERENCES

- Aguiar, M.I.; Maia, S.M.F.; Oliveira, T.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J.A., 2006. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. *Revista Ciência Agronômica*, 37:270-278.
- Aguiar, M.I.; Maia, S.M.F.; Xavier, F.A.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J.A.; Oliveira, T.S., 2010. Sediment, nutrient and water losses by water erosion under agroforestry systems in the semi-arid region in northeastern Brazil. *Agroforestry Systems*, 79:277-289.

Aguiar, M.I.; Fialho, J.S.; Campanha, M.M.; Oliveira, T.S. (In press). Florística e estrutura de áreas de Caatinga conservada e sob diferentes sistemas de manejo. *Ciência Florestal*.

Akhter, N.; Rahman, M.M.; Hasanuzzaman, M.; Nahar, K., 2009. Dry matter partitioning in garden pea (*Pisum sativum* L.) as influenced by different light levels. *Academic Journal of Plant Science*, 2:233-236.

Alfaia, S.S.; Ribeiro, G.A.; Nobre, A.D.; Luizão, R.C.; Luizão, F.J., 2004. Evaluation of soil fertility in smallholder agroforestry systems and pastures in western Amazonia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 102:409-414.

Boussadia, O.; Steppe, K.; Zgallai, H.; El Hadj, S.B.; Braham, M.; Lemeur, R.; Van Labeke, M.C., 2010. Effects of nitrogen deficiency on leaf photosynthesis, carbohydrate status and biomass production in two olive cultivars 'Meski' and 'Koroneiki'. *Scientia Horticulturae*, 123:336-342.

Brocque, A.F.; Goodhew, K.A.; Zammit, C.A., 2009. Overstorey tree density and understorey regrowth effects on plant composition, stand structure and floristic richness in grazed temperate woodlands in eastern Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 129:17-27.

Campanha, M.M.; Aguiar, M.I.; Maia, S.M.; Oliveira, T.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J.A., 2008. *Perdas de solo, água e nutrientes pela erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo agroflorestal no semiárido cearense*. Sobral: Embrapa, Circular Técnica, 37.

Campanha, M.M.; Araújo, F.S.; Menezes, M.O.; Silva, V.M.; Medeiros, H.R., 2011. Structure of plant community of shrubs and trees in agrosilvopasture system, in Sobral – CE. *Revista Caatinga*, 24:94-101.

Campanha, M.M.; Nogueira, R.S.; Oliveira, T.S.; Teixeira, A.S.; Romero, R.E., 2009. *Teores e estoque de carbono no solo de sistemas agroflorestais e tradicionais no semiárido brasileiro*. Sobral: Embrapa, Circular Técnica, 42.

Cannavo, P.; Sansoulet, J.; Harmand, J-M.; Siles, P.; Dreyer, E.; Vaast, P., 2011. Agroforestry associating coffee and *Inga densiflora* results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140:1-13.

Carvalho, P.E.R., 2008. *Pau-branco-do-sertão (Auxemma oncocalyx)*. Colombo-PR: Embrapa Florestas, Circular Técnica, 153.

Chapotin, S.M.; Razanameharizaka, J.H.; Holbrook, N.M., 2006. Baobab trees (*Adansonia*) in Madagascar use stored water to flush new leaves but not to support stomatal opening before the rainy season. *New Phytologist*, 169:549–559.

- D'Ambrosio, N.; Arena, C.; Santo, A.V., 2006. Temperature response of photosynthesis, excitation energy dissipation and alternative electron sinks to carbon assimilation in *Beta vulgaris* L. *Environmental and Experimental Botany*, 55:248-257.
- Dai, Y.; Shen, Z.; Liu, Y.; Wang, L.; Hannaway, D.; Lu, H., 2009. Effects of shade treatments on the photosynthetic capacity, chlorophyll fluorescence, and chlorophyll content of *Tetrastigma hemsleyanum* Diels et Gilg. *Environmental and Experimental Botany*, 65:177-182.
- Dexiang, C.; Xiaoquan, B.; Yide, L.; Wenfa, X.; Tushou, L.; Mingxian, L.; Han, X., 2008. Response of gas exchange to neighborhood interference in leaves of teak (*Tectona grandis* L. f.) in a tropical plantation forest. *Acta Ecologica Sinica*, 28:4059-4069.
- Eastham, J.; Rose, C.W.; Cameron, D.M.; Rance, S.J.; Talsma, T., 1988. The effect of tree spacing on evaporation from an agroforestry experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42:355-368.
- Egea, G.; Verhoef, A.; Vidale, P.L., 2011. Towards an improved and more flexible representation of water stress in coupled photosynthesis–stomatal conductance models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151:1370-1384.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, 1997. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura.
- Gerhardt, K., 1996. Effects of root competition and canopy openness on survival and growth of tree seedlings in a tropical seasonal dry forest. *Forest Ecology and Management*, 82:33-48.
- Gijón, M.D.C.; Gimenez, C.; Perez-López, D.; Guerrero, J.; Couceiro, J.F.; Moriana, A., 2011. Water relations of pistachio (*Pistacia vera* L.) as affected by phenological stages and water regimes. *Scientia Horticulturae*, 128:415-422.
- Gindaba, J.; Rozanov, A.; Negash, L., 2005. Photosynthetic gas exchange, growth and biomass allocation of two *Eucalyptus* and three indigenous tree species of Ethiopia under moisture deficit. *Forest Ecology and Management*, 205:127-138.
- Groot, A.; Saucier, J.P., 2008. Volume increment efficiency of *Picea mariana* in northern Ontario, Canada. *Forest Ecology and Management*, 255:1647-1653.
- Guerfel, M.; Obaccouri, O.; Boujnah, D.; ChaiïBi, W.; Zarrouk, M., 2009. Impacts of water stress on gas exchange, water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae*, 19:257–263.
- Hawkins, T.S.; Gardiner, E.S.; Comer, G.S., 2009. Modeling the relationship between extractable chlorophyll and SPAD-502 readings for endangered plant species research. *Journal for Nature Conservation*, 17:123-127.

- Herppich, M.; Herppich, W.B.; Willert, D.J., 2002. Leaf nitrogen content and photosynthetic activity in relation to soil nutrient availability in coastal and mountain fynbos plants (South Africa). *Basic and Applied Ecology*, 3:329-337.
- Holbrook, N.M., 1995. Stem water storage. Plant Stems, pp.151-174. In: Stems and trunks in plant form and function (Gartner, B.L., ed.). San Diego: Academic Press.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2006. *Censo Agropecuário*. Rio de Janeiro: IBGE.
- Kilpeläinen, A.; Routa, J.; Peltola, P.; Gerendiaín, A.Z.; Pulkkinen, P.; Kellomäki, S., 2010. Effects of genetic entry and competition on above ground biomass production of Norway spruce grown in southern Finland. *Forest Ecology and Management*, 259:2327-2332.
- Larcher, W., 2006. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: RiMa.
- Lemenih, M.; Gidyelw, T.; Teketay, D., 2004. Effects of canopy cover and understory environment of tree plantations on richness, density and size of colonizing woody species in southern Ethiopia. *Forest Ecology and Management*, 194:1-10.
- Lichtenthaler, K.K.; Ač, A.; Marek, M.V.; Kalina, J.; Urban, O., 2007. Differences in pigment composition, photosynthetic rates and chlorophyll fluorescence images of sun and shade leaves of four tree species. *Plant Physiology and Biochemistry*, 45:577-588.
- Lima, A.L.A.; Rodal, M.J.N., 2010. Phenology and wood density of plants growing in the semi-arid region of northeastern Brazil. *Journal of Arid Environments*, 74:1363-1373.
- Lott, J.E.; Howard, S.B.; Ong, C.K.; Black, C.R., 2000. Long-term productivity of a *Grevillea robusta*-based overstorey agroforestry system in semi-arid Kenya: I. Tree growth. *Forest Ecology and Management*, 139:175-186.
- Maes, W.H.; Achten, W.M.J.; Reubens, B.; Raes, D.; Samson, R.; Muys, B., 2009. Plant–water relationships and growth strategies of *Jatropha curcas* L. seedlings under different levels of drought stress. *Journal of Arid Environments*, 73:877-884.
- Maia, S.M.F.; Xavier, F.A.S.; Oliveira, T.S.; Mendonca, E.S.; Araújo-Filho, J.A., 2007. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. *Agroforestry Systems*, 71:127-138.
- Maia, S.M.F.; Xavier, F.A.S.; Oliveira, T.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J.A., 2008. Frações de nitrogênio em Luvisolo sob sistemas agroflorestais e convencional no semi-árido cearense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:381-392.

Maire, G.; Nouvellon, Y.; Christina, M.; Ponzoni, F.J.; Gonçalves, J.L.M.; Bouillet, J-P.; Laclau, J-P., 2012. Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of single- and mixed-species *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* plantations. *Forest Ecology and Management*.

www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112712001296. Accessed 06 May 2012.

Mahouachi, J., 2009. Changes in nutrient concentrations and leaf gas exchange parameters in banana plantlets under gradual soil moisture depletion. *Scientia Horticulturae*, 120:460-466.

Mcdonald, M.A.; Healey, J.R.; Stevens, P.A., 2002. The effects of secondary forest clearance and subsequent land-use on erosion losses and soil properties in the Blue Mountains of Jamaica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 92:1-19.

Menezes, R.S.C.; Salcedo, I.H.; Elliott, E.T., 2002. Microclimate and nutrient dynamics in a silvopastoral system of semiarid northeastern Brazil. *Agroforestry Systems*, 56:27-38.

Microcal Software INC., 1997. Data analysis and technical graphics software. Origin Professional version 6.0. Northampton, MA.

Minotta, G.; Pinzauti, S., 1996. Effects of light and soil fertility on growth, leaf chlorophyll content and nutrient use efficiency of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings. *Forest Ecology and Management*, 86:61-71.

Moço, M.K.S.; Gama-Rodrigues, E.F.; Gama-Rodrigues, A.C.; Machado, R.C.R.; Baligar, V.C., 2010. Relationships between invertebrate communities, litter quality and soil attributes under different cacao agroforestry systems in the south of Bahia, Brazil. *Applied Soil Ecology*, 46:347-354.

Muthuri, C.W.; Ong, C.K.; Craigon, J.; Mati, B.M.; Ngumi, V.W.; Black, C.R., 2009. Gas exchange and water use efficiency of trees and maize in agroforestry systems in semi-arid Kenya. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 129:497-507.

Nair, P.K.R.; Gordon, A.M.; Mosquera-Losada, M.R., 2008. Agroforestry, pp. 101-110. In: *Encyclopedia of Ecology* (Jorgensen, S.E.; Fath, B.D., eds.). Oxford: Elsevier.

Rego, G.M.; Possamai, E., 2006. Efeito do sombreamento sobre o teor de clorofila e crescimento inicial do jequitibá-rosa. *Boletim de Pesquisa Florestal*, 53:179-194.

Robakowski, P.; Wyka, T.; Samardakiewicz, S.; Kierzkowski, D., 2004. Growth, photosynthesis, and needle structure of silver fir (*Abies alba* Mill.) seedlings under different canopies. *Forest Ecology and Management*, 201:211-227.

Rodrigues, B.M.; Arcoverde, G.B.; Antonino, A.C.; Santos, M.G., 2011. Water relations in physic nut according to climatic seasonality, in semiarid regions. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46:1112-1115.

Romero, P.; Botía, P., 2006. Daily and seasonal patterns of leaf water relations and gas exchange of regulated deficit-irrigated almond trees under semiarid conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 56:158-173.

Santos, C.M.; Verissimo, V.; Wanderley-Filho, H.C.L.; Ferreira, V.M.; Cavalcante, P.G.S.; Rolim, E.V.; Endres, L., 2013. Seasonal variations of photosynthesis, gas exchange, quantum efficiency of photosystem II and biochemical responses of *Jatropha curcas* L. grown in semi-humid and semi-arid areas subject to water stress. *Industrial Crops and Products*, 41, 203-213.

Silva, G.L.; Lima, H.V.; Campanha, M.M.; Gilkes, R.J.; Oliveira, T.S., 2011. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma*, 167–168:61-70.

Singh, G.; Mutha, S.; Bala, N., 2007. Effect of tree density on productivity of a *Prosopis cineraria* agroforestry system in North Western India. *Journal of Arid Environments*, 70:152-163.

Souza, H.N.; Goede, R.G.M.; Brussaard, L.; Cardoso, I.M.; Duarte, E.M.G.; Fernandes, R.B.A.; Gomes, L.C.; Pulleman, M.M., 2012. Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 146:179-196.

Stiller, V., 2009. Soil salinity and drought alter wood density and vulnerability to xylem cavitation of baldcypress (*Taxodium distichum* (L.) Rich.) seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 67:164-171.

Streck, N., 2003. Stomatal response to water vapor pressure deficit: an unsolved question. *Revista Brasileira de Agrociência*, 9:317-322.

Taylor, A.H.; Jinyan, H.; Shiqiang, Z., 2004. Canopy tree development and undergrowth bamboo dynamics in old-growth *Abies*–*Betula* forests in southwestern China: a 12-year study. *Forest Ecology and Management*, 200:347-360.

Turner, D.W.; Thomas, D.S., 1998. Measurements of plant and soil water status and their association with leaf gas exchange in banana (*Musa* spp.): a laticiferous plant. *Scientia Horticulturae*, 77:177-193.

Uemura, A.; Ishida, A.; Matsumoto, Y., 2005. Simulated seasonal changes of CO₂ and H₂O exchange at the top canopies of two *Fagus* trees in a winter-deciduous forest, Japan. *Forest Ecology and Management*, 212:230-242.

Woodward, F.I.; Lomas, M.R.; Kelly, C.K., 2004. Global climate and the distribution of plant biomes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 359:1465–1476.

Wright, I.J.; Ackerly, D.D.; Bongers, F.; Harms, K.E.; Ibarra-Manriquez, G.; Martinez-Ramos, M.; Mazer, S.J.; Muller-Landau, H.C.; Paz, H.; Pitman, N.C.A.; Poorter, L.; Silman, M.R.; Vriesendorp, C.F.; Webb, C.O.; Westoby, M.; Wright, S.J., 2007. Relationships among ecologically important dimensions of plant trait variation in seven Neotropical Forests. *Annals of Botany*, 99:1003–1015.

CAPÍTULO 4

(Enviado para a revista Agroforestry Systems)

SOIL-PLANT WATER RELATIONS UNDER NATIVE AND CULTIVATED VEGETATION IN SEMIARID BRAZIL

Abstract - This work, divided into two stages, was undertaken to evaluate competition for water between native trees and cultivated plants, and to determine water harvesting zones for tree species in agrosilvopastoral systems (AGP) and secondary forest (SF). In the first stage, physiological parameters were evaluated in maize (*Zea mays* L.) planted at four different distances from *Cordia oncocalyx* trees. In the second stage the same parameters were measured on trees growing in AGP and SF. Precipitation and soil water content were measured at two meteorological stations. Oxygen isotopes ($\delta^{18}\text{O}$) in rainwater, soil and plant roots were used to determine the water harvesting zones of the species under study. The soil's volumetric water content varied with land use system and soil depth, and was lesser at 0-30 cm under SF, and at 30-50 cm under AGP. These differences can be related to differences in the rooting depth of *C. oncocalyx* and its water absorption zones. Indeed, rooting depth for this species was shallower under SF and deeper under AGP. The water absorption zone of *C. oncocalyx* overlaps with that of maize, and this combined with reduced soil moisture at 30-50 cm depth indicate the existence of competition for water between these species.

Keywords: Agrosilvopastoral system. Maize. *Cordia oncocalyx*. Gas exchange. Stable isotopes. Competition.

1 INTRODUCTION

Agroforestry has provided an alternative to conventional cropping systems, by including the management of larger plants (shrubs and trees). Some studies show the benefits of agroforestry in comparison to monoculture (Hirota *et al.*, 2004; Maia *et al.*, 2007; Moco *et al.*, 2009), despite the potential for water, light and nutrient competition between cultivated plants and trees (Reynolds *et al.*, 2007; Lott *et al.*, 2009). Jackson *et al.* (2000) observed greater water losses from agroforestry

systems through the drainage of deep water, since tree and crop species grown separately used less water. Asbjornsen *et al.* (2007) suggested that a more in-depth analysis of water cycling patterns between environmental pools and plants (including transpiration and water redistribution) was needed to better understand differential responses in water absorption patterns of plant species and communities. Plants with low water use efficiency consume more water, depleting the resource (Radersma; Ong, 2004) in order to maintain stomatal conductance and photosynthesis. Water competition between species through interference or exploration is thus intensified, especially when root distribution patterns overlap.

The source of water taken up by plants can change depending on the season (Moreira *et al.*, 2000) or according to water availability and rooting depth (Walker; Richardson, 1991). Also, plants can absorb rainwater directly through leaves (Yang *et al.*, 2010). When a plant's water needs exceed the supply, it must find other sources of water or use it more conservatively to minimize water stress and maintain metabolic functions (Horton; Hart, 1998). Indeed plants can take up more superficial water during rainy periods, and deeper water during dry periods (Sekiya; Yano, 2002). Such a capacity to change rapidly source water from different regions of the soil can give an advantage to plants, when water competition occurs within the ecosystem (Ehleringer; Dawson, 1992).

Isotopic techniques allow the indirect assessment of plant root access to resources (Burgess *et al.*, 2000), since the isotopic composition of the resource is not altered during plant extraction. If a plant were to obtain water from a single source, the isotopic composition of the plant's water would be identical to that of the source water (Walker *et al.*, 2001). According to Jackson *et al.* (1995), isotopic techniques are an alternative for the study of water absorption by plants, and may lead to an understanding of mechanisms which allow the coexistence of species.

The oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) and hydrogen (δD) isotopic composition of water are ideal tracers for the source of water absorbed by plants (Horita; Kendall, 2004). If the δD and/or $\delta^{18}\text{O}$ differs between water of different environmental pools (atmosphere/precipitation, aquifer, topsoil, subsoil, water bodies, etc) (Coutinho *et al.*, 1996), comparing δD and/or $\delta^{18}\text{O}$ values from all sources allows plant water to be related to that of available sources. Also, the depth from which water is taken up can

be determined since surface waters are richer in heavier isotopes due to evaporation, while the isotopic composition of deeper water is similar to that of rainwater (Durand *et al.*, 2007).

The objective of this work was to determine the existence of water competition between native trees and crop plants, and to assess the water uptake zones of trees in agrosilvopastoral systems (AGP) and secondary forest (SF) in Brazil's semiarid region using natural stable isotope abundance.

2 MATERIAL AND METHODS

2.1 Study area

This work took place at Crioula farm, which belongs to the National Center for Goats and Sheep Research (CNPQ) of the Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA). The farm is located in the municipality of Sobral (3° 41'S and 40° 20'W), State of Ceará. The region's climate is of the BSw'h' type according to Köppen's classification, with a rainy season between January and May. Average annual temperature and precipitation are 30 °C and 821.6 mm, respectively. Soils in the study area are shallow and consist of patches of typic Chromic Orthic Luvisol and typic Hypochromic Orthic Luvisol (Aguilar *et al.*, 2006). At the Crioula Farm experimental station, since 1997 three cropping systems are under investigation: agrosilvopastoral, silvopastoral and conventional cropping. Two secondary forests areas are used as references. The predominant vegetation in the area is woody savannahs (Woodward *et al.*, 2004), locally called *Caatinga*, which consists mainly of deciduous species which lose their leaves during the dry season which occurs between June and January.

For this work two areas were selected: AGP and SF. The AGP plot was set up in a 1.7 ha area, where maize (*Zea mays* L.) and/or sorghum (*Sorghum* sp.) is grown in 3.0 m-wide alleys separated by rows of *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit with 0.5 m between trees. Trees amount to approximately 200 per ha, covering 22% of the soil. No fertilizers or irrigation are applied, and all management is performed manually. The SF area covers 1.6 ha, and is approximately 50 years old. Nine tree species are found in these areas, and four are common to both: *Cordia*

oncocalyx Allemão, *Mimosa caesalpinifolia* Benth., *Poincianella bracteosa* (Tul.) L.P. Queiroz and *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud. Tree density in the AGP system is seven times smaller than in SF (Campanha *et al.*, 2011). Clay, coarse sand, fine sand and silt contents are, respectively, 11%, 27%, 36% and 26% under AGP, and 17%, 32%, 23% and 28% under SF (Maia *et al.*, 2007). Photosynthetically active radiation crossing the canopy during the rainy period, when trees have leaves, is on average $535.81 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in AGP and $59.22 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in SF. This data was collected using equipment installed in the field, for the period between 6 and 18h.

2.2 Studied species

The native tree *C. Oncocalyx*, Boraginaceae, was selected because it is found under both land uses and because it is frequent (49.1% in AGP and 50% in SF; Aguiar *et al.*, 2010). *C. oncocalyx* trees are deciduous and reach 10 m in height. They produce leaves and flower at the onset of the rainy period (January/February), and set fruit in March. Fruit stays on the trees until the onset of the dry season (July/August), at which times leaves fall. *C. oncocalyx* occurs as 670 and 80 individuals per ha in SF and AGP, respectively (Aguiar *et al.*, in preparation).

Maize variety *catigueiro* was grown in the AGP system, to assess competition with trees. Maize was planted on 15 February over the entire AGP field, with three seeds placed in each hole, and it was harvested on May 19th 2011. Five plots measuring 8 x 8 m were delimited, with a *C. oncocalyx* individual at the center. Four rows of maize were planted on each side of the tree in a north-south orientation, with 1 m between plants. Within these plots, the treatments consisted of two rows of maize (one on each side of the tree) planted at four distances from the base of the *C. oncocalyx* tree: M1, M2, M3 and M4 for maize planted at 1, 2, 3 and 4 m from the base of the tree, respectively (Figure 4.1). The first two distances resulted in maize growing entirely below the canopy, the third distance was intermediary and at 4 m plants were completely exposed to the sun, outside the shade produced by the tree's crown at noon. On each of the two sampling dates in April and May, one plant per treatment per plot was harvested in each of the five replicated plots. This yielded a total of five harvested plants per harvest date, per treatment.

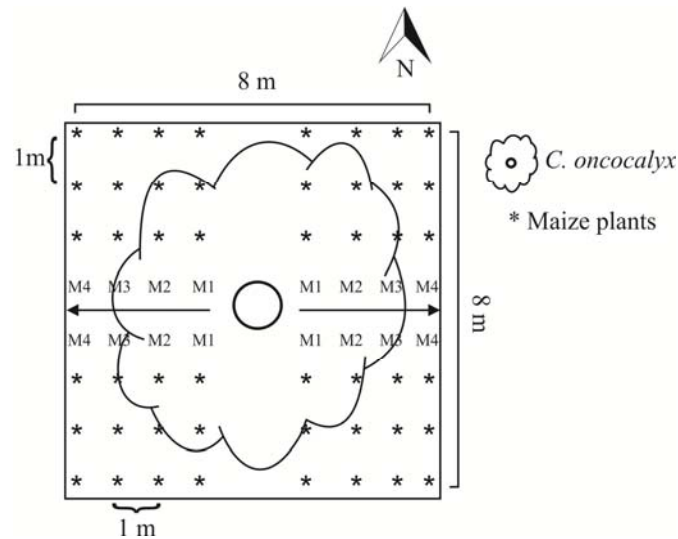


Figure 4.1. Diagram showing the layout of maize plants and the *C. oncocalyx* tree in each plot. Arrows indicate harvested plants (one side of the tree harvested on each sampling date) and M1, M2, M3 and M4 represent the different treatments. Five such plots were established in the experimental area.

2.3 Meteorological and soil data

Meteorological data was collected between April and May 2011 from two weather stations (Campbell Scientific, INC, Utah, USA) installed three meters away from the base of *C. oncocalyx* trees in the AGP system, and under a closed *C. oncocalyx* canopy under SF. Among other data, stations recorded soil moisture (TDR sensors) at 0-30 and 30-50 cm depth and at 30 s intervals. This data was averaged over 15 min and these averages were stored in the datalogger, for a total of 96 readings per day. Two raingauges, one in each land use, were also connected to the weather stations and recorded total precipitation during 15 min intervals.

2.4 Physiological measurements

Stomatal conductance (g_s) and transpiration (E) were measured on leaves from the top of *C. oncocalyx* crowns which were completely exposed to the sun, between eight and nine meters above the ground. To access these leaves, three scaffolds were erected in each land use, beside three different trees in each land use. Measurements were made on 19 April between 10:00 and 11:00, and 17 May 2011 at 7:00-8:00, 9:00-10:00, 12:00-13:00 and 16:00-17:00. Data was obtained using an infrared gas analyzer (LI-6400XT, LI-COR Biosciences, USA) on three leaves per tree, and measurements were repeated three times on each leaf.

In maize, g_s and E were measured 60 days after sowing (on April 19th 2011). Plants were in the reproductive stage. Data was taken on a single row which crossed all four treatments (similarly to plant harvesting, see Figure 4.1), at the following times: 9:00-10:00, 12:00-13:00 and 15:00-16:00. The uppermost fully expanded leaf was used to make a measurement on one plant per treatment, in each of the five replicated plots.

Net photosynthesis (A) in maize and *C. oncocalyx* was measured at the same time and leaves as g_s and E parameters. This data was used only to calculate water use efficiency (A/E). Water potential at noon (Ψ) was measured in maize and *C. oncocalyx* using a Scholander pressure chamber (Soil Moisture Equipment Corp, USA) on 19 April.

2.5 *Cordia oncocalyx* rooting depth

Main lateral roots length of *C. oncocalyx* was measured by digging in February and July, for three trees in AGP and three in SF. Soil was removed from the surface until main roots were found, and these roots were followed away from the tree's base (up to 4 m). Rooting depth was determined by cutting trees and completely removing roots from the soil.

2.6 Isotope analysis

Maize and *C. oncocalyx* root samples were collected, along with soil and rainwater to analyze stable oxygen isotopes ($\delta^{18}\text{O}$). While digging to measure root length in *C. oncocalyx*, three roots cylinders (5.0 cm high and 0.5 cm diameter) were taken. Maize xylem water was collected by removing all roots from five plants in each treatment (Ehleringer and Osmond 1989; Jackson et al. 1995). These samples were placed in plastic bottles, capped and sealed with semitransparent, flexible and watertight plastic film. The three roots cylinders and total roots from each of the five maize plants in each treatment were composited into one single sample per treatment for isotopic analysis, and no statistical analysis was thus possible for this data.

Two rainwater collectors were installed, one in each land use. Samples were stored in plastic bottles (5.0 ml capacity), and sealed to avoid evaporation and

the resulting isotopic fractionation. Soil samples were collected from depth increments 0-20, 20-40 and 40-60 cm, under the crown of trees, and processed similarly to roots. All samples for isotopic analysis were placed on ice to further minimize evaporation during transport to the laboratory where they were stored, refrigerated, until water extraction by vacuum distillation. This was carried out at the Isotopic Ecology Laboratory of the Center for Nuclear Energy in Agriculture of the University of São Paulo.

Maize roots were collected on April 25th and May 19th, and *C. oncocalyx* roots on May 19th 2011. Rainwater samples were collected on April 25th, but not in May since no rain had fallen in the days prior to or on the day when roots were harvested. Rainwater collected on April 25th corresponded to a single rainfall event. Soil was collected in both months.

From the water extracted from root and soil samples, as well as rainwater, approximately 1 μL of water was used to measure ratios between concentrations of water molecules with different combinations of H and O isotopes (HD^{16}O , H_2^{16}O and H_2^{18}O), using a liquid water isotope analyzer (DLT-100, LGR, CA, USA). The ratios, corrected using a calibration curve and working standards, were expressed as δ in parts per mil (‰) as relative deviations from the V-SMOW international standard, as calculated by equation $\delta = \left(\left\{ \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} \right\} - 1 \right) \times 1000$, where R is the ratio $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ of the sample and the standard.

2.7 Statistical analysis

The Student t test was used to test the significance of differences between the means of physiological parameters in *C. oncocalyx*, as well as soil moisture between land uses and depth increments, with $\alpha=0.05$. An analysis of variance was followed by the Tukey test, at $\alpha=0.05$, to assess the significance of differences in physiological parameters measured in the different maize treatments.

3 RESULTS

The soil's volumetric water content was greater at the surface (up to 30 cm depth) in AGP (Figure 4.2A), while in SF moisture was greatest at 30-50 cm depth

(Figure 4.2B). This was true in both months when measurements were made. At 30-50 cm soil moisture was greater under SF. Average soil moisture under AGP at 0-30 cm ($0.49 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) and at 30-50 cm ($0.41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) in April was 5.4% and 27.1% lesser, respectively, than under SF ($p < 0.001$). In May, moisture under AGP at 30-50 cm was 24.0% lesser than under SF ($p < 0.001$). Also in May and at 0-30 cm depth, moisture level under both systems was not statistically different ($p = 0.17$). The reduction in volumetric water content during a short dry period was greater at 30-50 cm in AGP, and at 0-30 cm in SF. For example, between 11 and 18 May, moisture dropped by 31.8% and 21.6% at 30-50 and 0-30 cm, respectively, in AGP. In SF, the reductions were 15.1% and 22.3% at the same depths. The greatest changes in soil water content occurred after rainfall events.

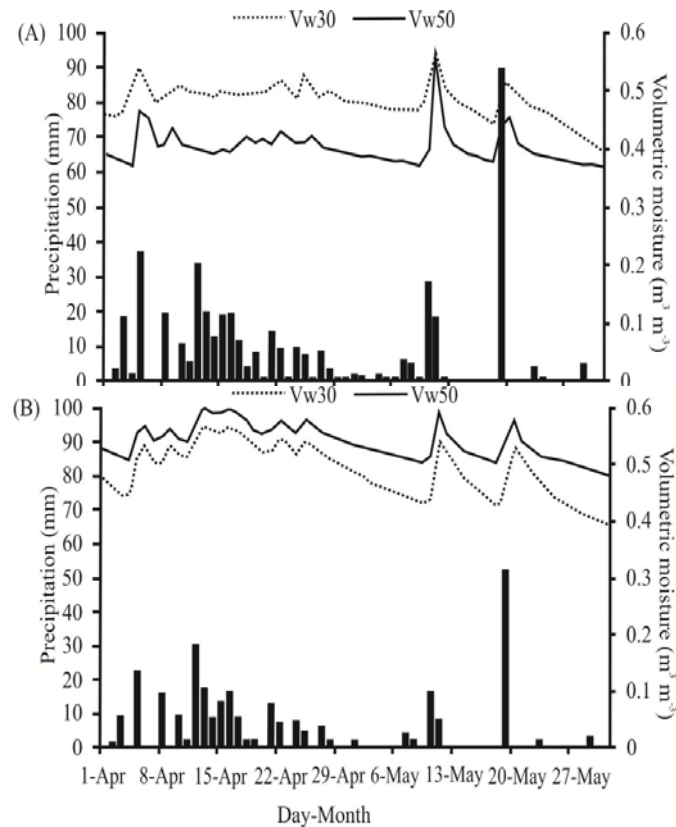


Figure 4.2. Precipitation (black bars) and volumetric soil moisture content during April and May 2011 in an agrosilvopastoral (A) and secondary forest (B) at Crioula Farm in Sobral, CE. Vw30 and Vw50: soil volumetric water content at 0-30 and 30-50 cm depth, respectively.

Figure 4.3 shows in more detail the changes in soil moisture in relation to rainfall and time on two single days in April and May, and in AGP and SF. On April 25th, date of collect of roots to isotopic analysis, rainfall amounted to 7.4 mm in AGP

and 5.1 mm in SF. No precipitation occurred immediately before sampling in May. Soil volumetric moisture was lesser in May than April at both studied depths, and in both land use systems.

The soil water content (Figure 4.3) was different in the different land use systems and depths when analyzed in detail over the course of one day, similarly to the patterns observed over the course of two months (Figure 4.2). Water content during these single days was greater at SF than AGP, at 0-30 and 30-50 cm depths in April and at 30-50 cm in May. A period of constant rainfall preceded April 25th, and on this date soil moisture content in AGP was on average 0.53 and 0.41 m³ m⁻³ at 0-30 and 30-50 cm, respectively, which is lesser than in SF (0.54 and 0.58 m³ m⁻³, $p = 0.0013$ and $p < 0.0001$). On May 19th, after seven days when no rainfall was observed, soil moisture under AGP was lesser than under SF at 30-50 cm ($p < 0.0001$), but not at 0-30 cm depth where moisture was 0.49 m³ m⁻³ in AGP and 0.47 m³ m⁻³ in SF ($p < 0.0001$). This indicates that, over a short dry period, the AGP system maintains more water near the surface than SF. The greatest difference in moisture content between depths was observed in AGP in April, where moisture was reduced by 0.12 m³ m⁻³ between 30 and 50 cm. The greatest difference between depths in SF was 0.07 m³ m⁻³, but with an increase from 0-30 to 30-50 cm.

On April 25th, the accumulation of 6.4 mm of rain between 8:00 and 11:00 in AGP produced a rapid increase in soil moisture of 12.7% at 30 cm, while at 50 cm moisture increased sparingly and gradually (Figure 4.3A). In SF, the 4.6 mm in the same rainfall event resulted in a 5.0% increase in soil moisture at 0-30 cm, and 11.0% at 30-50 cm (Figure 4.3B). On May 19th a significant rainfall event (89.4 mm) occurred in the afternoon, which also led to a sharp increase in soil moisture content in AGP at 0-30 cm. Two hours after the rain event, soil moisture at 30 cm was equivalent to that at 30-50 cm (Figure 4.3C). In SF, the abundant rainfall which occurred on that day (52.6 mm) resulted in soil moisture being equivalent at both study depths. Soil moisture levels later diverged, and at 0-30 cm moisture was rapidly reduced (Figure 4.3D).

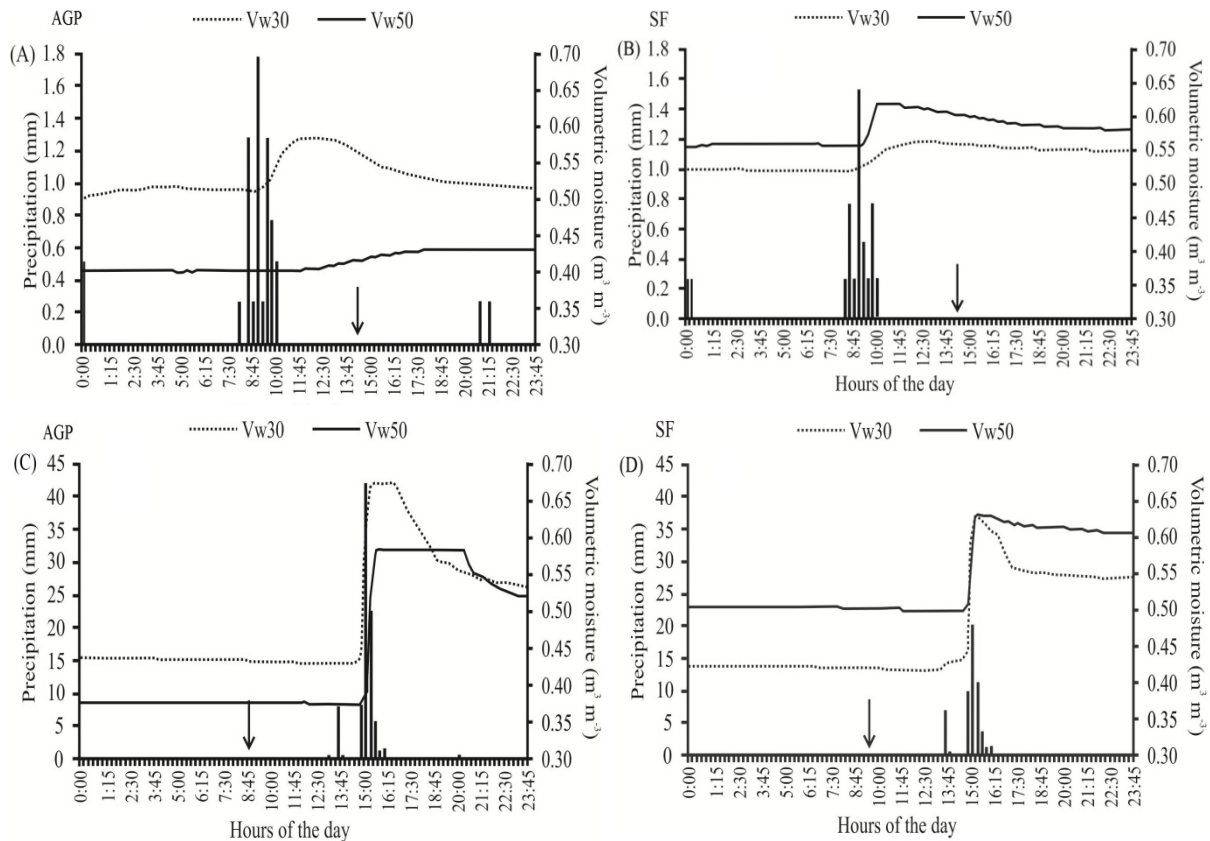


Figure 4.3. Precipitation (black bars) and volumetric soil water content at 0-30 and 30-50 cm depths (Vw30 and Vw50, respectively) in an agrosilvopastoral system (AGP) and secondary forest (SF) on April 25th (A and C) and May 19th (B and D). Arrows indicate the approximate time when root sampling occurred.

Stomatal conductance (g_s) in *C. oncocalyx* responded to changes in soil moisture during the studied months and was greater in April than May, however no differences were observed between land uses. In April average g_s values were similar ($p = 0.06$) in both AGP ($0.37 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) and SF ($0.30 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). In May g_s values varied between 0.16 and $0.26 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, for the period between 7:00 and 16:00 (Figure 4.4A). However, no significant differences were observed between land use systems, at any of the monitored times ($p > 0.05$). Transpiration (E) in *C. oncocalyx* trees was also similar in both land use systems in April, with average values of $7.10 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in AGP and $6.91 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in SF. Contrarily to g_s , E was greater in SF in May between 7:00 and 12:00, and decreased to values similar to AGP by 16:00 (Figure 4.4B).

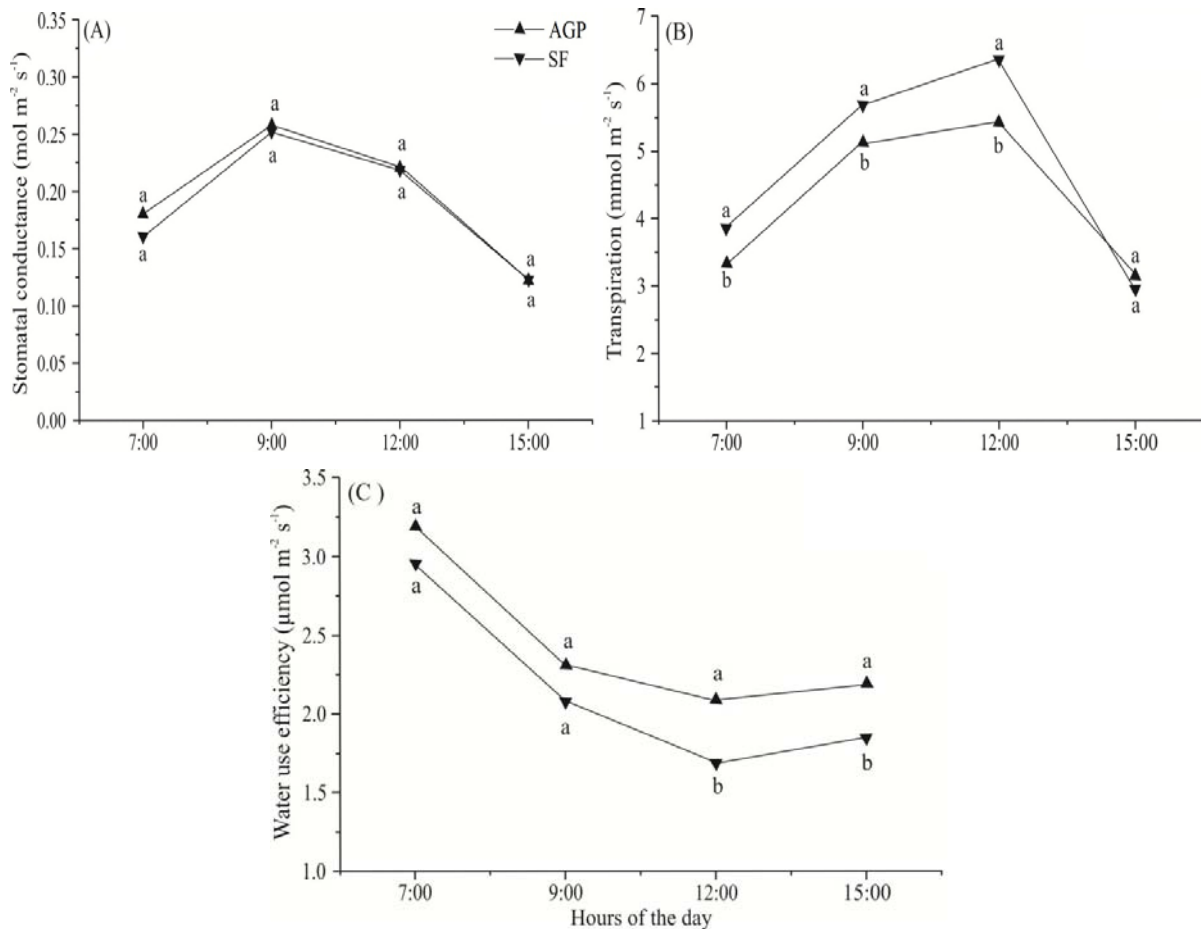


Figure 4.4. Stomatal conductance (A), transpiration (B) and water use efficiency (C) of *C. oncocalyx* on May 17th in an agrosilvopastoral system (AGP) and secondary forest (SF). For comparisons between land uses, means followed by the same letter do not differ significantly as determined by the Student t test at $\alpha=0.05$ ($n=9$).

In April, water use efficiency (WUE) in *C. oncocalyx* did not differ significantly ($p>0.05$) between the two land use systems, averaging 2.04 and 1.99 $\mu\text{mol mmol}^{-1}$ in AGP and SF, respectively. Trees in AGP had greater WUE than in SF on the May monitoring date beginning at noon (Figure 4.4C), with the difference still in effect at 16:00 after the rain event. On this day water use efficiency was greatest at 7:00 in both land uses and started to decrease at 9:00, with the trend continuing until 16:00. The Ψ in *C. oncocalyx* trees at noon differed significantly ($p<0.05$) between land uses in April, when average values were -0.54 and -0.63 MPa for AGP and SF, respectively.

In maize plants, g_s differed between treatments at 9:00 and 12:00, but not at 15:00 (Figure 4.5A). Lower g_s values were recorded in maize under the crown of a *C. oncocalyx* tree (M1) in the morning, and the greatest values were recorded in

maize plants away from the crown (M3 and M4) at noon. Transpiration data (Figure 4.5B) was similar to g_s data. Water use efficiency (Figure 4.5C) had a behaviour opposite to that of E , where no differences between treatments were observed at 9:00 and values decreased thereafter. The lowest averages were recorded at noon, when the M1 treatment showed the lowest WUE of the day and when significant differences between plants growing under and away from a tree crown occurred. The M3 and M4 treatments had the greatest WUE between noon and 15:00. No significant differences ($p > 0.05$) in Ψ were observed between maize treatments at noon, with treatment averages of -0.50, -0.50, -0.48 and -0.47 MPa for M1, M2, M3 and M4, respectively.

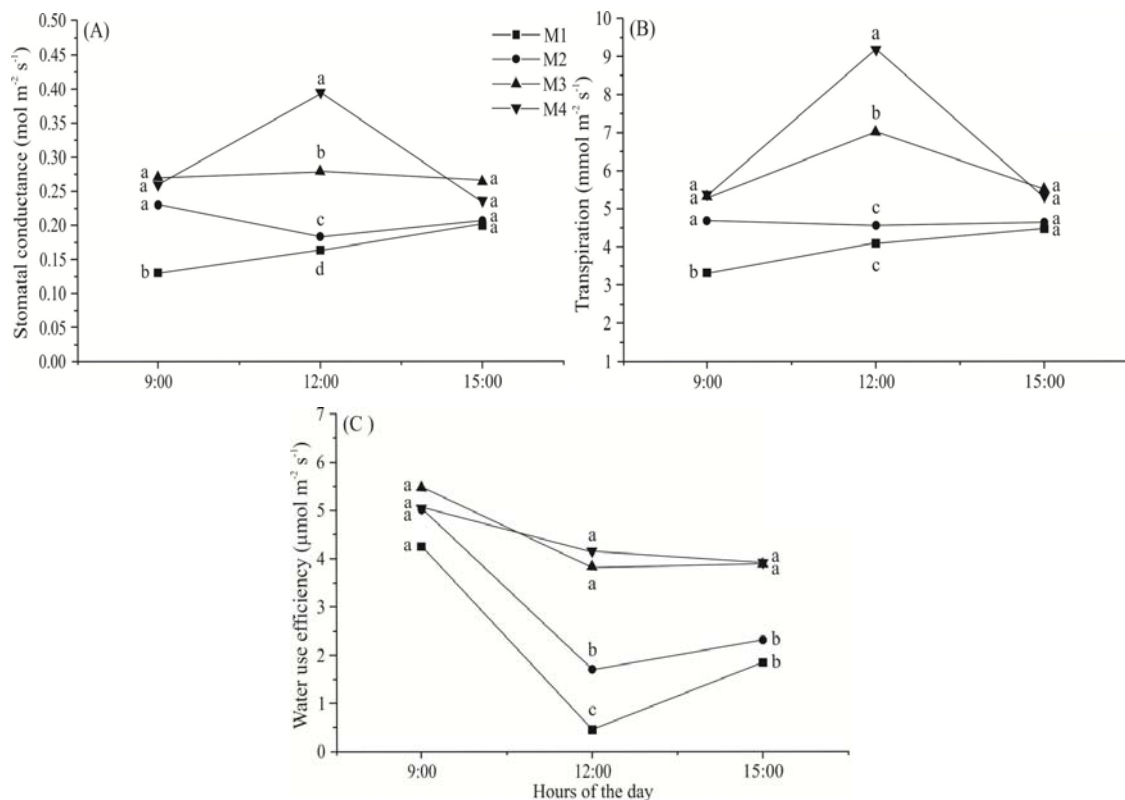


Figure 4.5. Stomatal conductance (A), transpiration (B) and water use efficiency (C) in April for maize growing 1.0 (M1), 2.0 (M2), 3.0 (M3) and 4.0 (M4) meters away from the base of a *C. oncostylis* tree in an agrosilvopastoral system. For comparisons between treatments, means followed by identical letters do not differ according to the Tukey test at $\alpha=0.05$ ($n=5$).

Soil excavations demonstrated that *C. oncostylis* does not have a taproot, but rather many similar roots which reach 20 to 80 cm in depth in either land use

system. Rooting depth varies with the size of the plant, and roots extend laterally up to 3 m (in SF) and 4 m (in AGP).

The isotopic composition of *C. oncocalyx* root sap water in AGP was similar to that of the subsoil (40-60 cm depth), and this indicates that the trees preferentially capture water from this depth. Under SF, *C. oncocalyx* root sap water was similar to isotopic composition topsoil (0-20 cm depth). In this land use the trees thus preferentially obtain water from surface soil (Figure 4.6). The $\delta^{18}\text{O}$ of maize root sap showed that these plants take up water from soil below 20 cm depth. In April, the 0-20 cm soil depth increment was richer in heavier isotopes (Figure 4.7A). Deeper soil layers had isotopic values similar to rainwater, after three rainy days. In May, roots of maize in the M1 and M4 treatments had a greater abundance of heavier isotopes, similar to that of deeper soil layers (Figure 4.7B), while surface soil (0-20 cm depth) was ^{18}O -depleted.

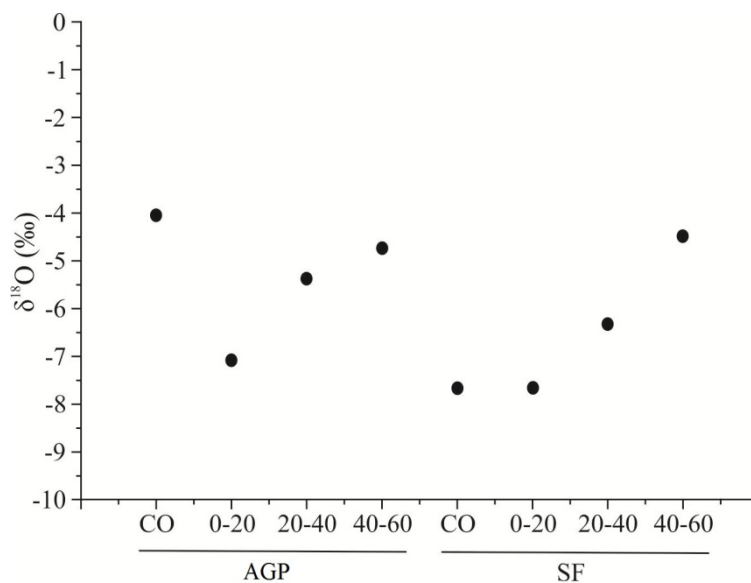


Figure 4.6. Oxygen isotope ratios ($\delta^{18}\text{O}$) of *C. oncocalyx* xylem root sap (CO) and soil water at the 0-20, 20-40 and 40-60 cm depth increments under an agrosilvopastoral system (AGP) and secondary forest (SF).

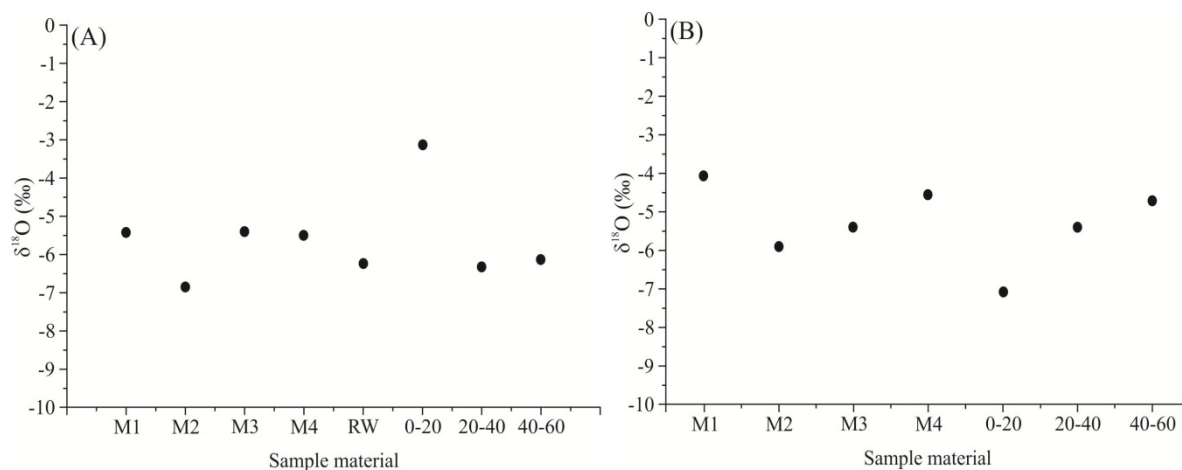


Figure 4.7. Oxygen isotope ratios ($\delta^{18}\text{O}$) of water extracted from roots of maize growing 1.0 (M1), 2.0 (M2), 3.0 (M3) and 4.0 (M4) meters from the base of a *C. oncocalyx* tree, rainwater (RW) and of soil water from the 0-20, 20-40 and 40-60 cm depth increments in an agrosilvopastoral system in April (A) and May (B).

4 DISCUSSION

Soil moisture content at a depth of 0-30 cm under AGP was slightly lower than under SF, in April. Greater sun exposure or lesser plant cover increases soil water losses by evaporation (Lin, 2010), mostly near the surface (Mestas-Valero *et al.*, 2012). In both land use systems, soil moisture contents varied with depth. Soil moisture can vary with evapotranspiration and the vertical movement of water (infiltration and capillary rise), and these processes themselves vary with soil cover (Mahmood; Hubbard, 2003; Mati *et al.*, 2011). Jackson *et al.* (2000) found little vertical variation in soil moisture under exclusive tree cover, while under an agroforestry system where maize was grown between trees, moisture was strongly depleted in the subsoil.

The stable isotope analysis confirmed the existence of processes which alter soil moisture. Under maize, the $\delta^{18}\text{O}$ value decreased in soil depth in the AGP in April, indicating greater evaporation in the topsoil (0-20 cm depth) (Figure 4.7A). The lower $\delta^{18}\text{O}$ value in the subsoil, similar to rainwater, relates to previously infiltrated water. As distance from the surface decreases, evaporation increases and soil water becomes depleted in light isotopes (^{16}O) and enriched in heavier isotopes (^{18}O); the value of $\delta^{18}\text{O}$ thus increases (Hsieh *et al.*, 1998). In deeper soil layers $\delta^{18}\text{O}$ values are similar to those of rainwater which infiltrated the soil (Durand *et al.*, 2007).

The fact that the g_s of *C. oncocalyx* was similar in both land use types indicates that soil water levels were sufficient to meet the tree's demands in April, and this is confirmed by the lack of differences in WUE and high g_s values in April when compared to May. A sharp reduction in soil moisture is required to negatively impact the physiological processes of plants. Sumayao *et al.* (1977) and Lagergren and Lindroth (2002) observed reduced transpiration in *Sorghum* sp. and trees only when 65% and 80% of the soil's extractable water had been exhausted, respectively.

In May, the greater E values of plants in SF, with g_s values similar in both land uses, reveal water losses through the cuticle and a poor ability to reduce such losses. Since E is considerably dependent on soil moisture (Guswa *et al.*, 2004), greater soil humidity in SF helped to maintain *C. oncocalyx* leaf transpiration without the loss of turgor pressure, represented by Ψ at noon. On the other hand, plants growing in AGP which had lower transpiration rates and a slightly greater Ψ increased their WUE and maintained g_s values similar to those of plants growing in SF.

The physiological behaviour of maize plants differed with treatments: g_s , E and WUE values increased as distance from the base of a *C. oncocalyx* tree increased. According to Novák *et al.* (2005), in the absence of water stress the relative E rate is practically independent from atmospheric factors such as water vapor deficit, air temperature and wind velocity. Indeed, since soil moisture levels were adequate in April, differences between maize plants in AGP are not explained by such atmospheric factors, but more likely by competition for light. Plants which were not under the direct influence of tree crowns had the best physiological data, as observed in M3 and M4.

The elevated transpiration values for *C. oncocalyx* as well as maize, particularly at noon, show that both species were continuously taking up soil water. It is common for tree species to have E rates lower than those of maize (Dawson, 1996; Lott *et al.*, 2003). Additionally, Lott *et al.* (2003) found that E in *Grevillea robusta* trees growing in an agroforestry system was lesser than in areas where the tree grew alone. In agroforestry systems, maize plants can also have reduced E and g_s values (Lott *et al.*, 2009), due to shading by trees. As such the similar E values in

maize and *C. oncocalyx* in this study provide further evidence of competition between the two species.

Water competition between cultivated grasses and tree species could be avoided due to root zone differentiation. For example, Lehmann *et al.* (1998) showed spatial root separation in *Sorghum* sp. and trees, where during the dry season *Sorghum* sp. roots occupied surface soil, and trees occupied deeper soil horizons. The rooting depth of plants determines the area from which they can take up water, and this area either coincides with that of other species or it does not. Isotope ratios of maize and *C. oncocalyx* xylem water are consistent with those of the subsoil. The xylem water in deep-rooted perennial species is depleted in heavy isotopes (Ehleringer *et al.*, 1991). If the $\delta^{18}\text{O}$ of xylem sap resembles that of the subsoil, there is evidence that the plant is obtaining water from the subsoil through deep roots.

Panda *et al.* (2004) found that maize plants preferentially obtain water from the 0-45 cm soil depth increment, in a subtropical Latosol. Also, Asbjornsem *et al.* (2007) observed greater $\delta^{18}\text{O}$ values in maize xylem water (-5.49‰), when compared to tree xylem water (~-7‰). This indicates that maize obtained water from shallower depths, and the authors calculated that 45% of the water harvested by maize came from the 0-20 cm depth increment. More recently, Mestas-Valero *et al.* (2012) found greater water depletion in the 0-20 cm depth increment, which they attributed to evaporation and absorption by maize. Some studies suggest that maize may obtain water from deeper soil layers, through a deeper root system. According to Gao *et al.* (2010), maize roots can reach depths greater than 40 cm in just over one month, and plants then preferentially use deeper water as they grow (Zhang *et al.*, 2011). Thus it is possible that maize develops a deeper root system and takes up water from the subsoil, thus competing with *C. oncocalyx* trees.

C₄ plants such as maize commonly have greater *E* and WUE than C₃ trees, and as such are highly competitive. Maize can effectively compete for water with C₃ weeds (Zand *et al.*, 2006). However, when maize competes with trees, competition occurs for both water and light and maize is outcompeted (Reynolds *et al.*, 2007). Mathuva *et al.* (1998) found that maize grown in an agroforestry system had a greater yield than in monoculture only when precipitation was greater than 500 mm yr⁻¹, and this suggests water competition within the system.

Some authors observed water redistribution by trees, with the supply of water to neighbouring plants (Moreira *et al.*, 2003; Sekiya; Yano, 2002; Bayala *et al.*, 2008; Armas *et al.*, 2010). For this to occur, water must be more available in the subsoil than the surface, and tree roots must reach these areas of greater water availability. Trees would then transfer water to more superficial soil layers at night, through matric potential differences (Caldwell *et al.*, 1998). In AGP, even if *C. oncocalyx* roots absorbed water from deeper soil layers, there was no redistribution of water in the soil profile because i) isotopic values of surface soil and *C. oncocalyx* are not similar, ii) maize took up water from deeper soil horizons and iii) there were no day/night variations in soil moisture.

On the other hand, it is possible that water rose through the soil profile by capillarity since a dry period preceded root harvest in May. Such a process was observed using stable isotopes by Romero-Saltos *et al.* (2005). Given that water carrying lighter isotopes would rise more easily (Dawson *et al.*, 2002), capillary rise could explain the increase in the isotopic ratio of the subsoil as well as the gradual reduction of the ratio as depth decreases. However, such a process should theoretically occur only under SF given its greater water content in the subsoil, since water moves in response to differences in matric potential. In the SF studied here, despite greater water contents in the subsoil, $\delta^{18}\text{O}$ values of *C. oncocalyx* indicate it preferentially absorbed water from the surface. Indeed, the largest nutrient stocks in forest soils are generally found near the surface.

5 CONCLUSIONS

Maize and *C. oncocalyx* in this AGP system preferentially take up water from soil depths greater than 20 cm, which lead to a reduction in soil moisture at 30-50 cm depth. In SF *C. oncocalyx* sources water from more superficial soil layers, up to 30 cm depth. Physiologically, *C. oncocalyx* trees growing in AGP and SF systems were very similar in April, which was a period of constant rainfall, but not in May after a short no rainfall period. At the latter date, transpiration and WUE differed during some periods of the day. As the subsoil contained more water than topsoil, it is possible that water rose through the soil profile by capillary rise in SF. Also, more *C.*

oncocalyx roots were present near the surface and they preferentially absorbed water from this layer. This could not have been the case in AGP, since soil moisture was greater near the surface. Stable isotope techniques were useful in this study of the complex water relations of a soil-plant system. However, more precision is needed, with general observations covering longer time periods to contrast punctual observations and also including comparisons of different environments. The semiarid region of Brazil offers many opportunities for such studies, with irregular rain patterns that strongly influence the development of vegetation and the productivity of agricultural systems.

REFERENCES

- Aguiar, M.I.; Maia, S.M.F.; Oliveira, T.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J.A., 2006. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. *Revista Ciência Agronômica*, 37:270 - 278.
- Aguiar, M.I.; Maia, S.M.F.; Xavier, F.A.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J.A.; Oliveira, T.S., 2010. Sediment, nutrient and water losses by water erosion under agroforestry systems in the semi-arid region in Northeastern Brazil. *Agroforestry Systems*, 79:277-289.
- Armas, C.; Padilla, F.M.; Pugnaire, F.I.; Jackson, R.B., 2010. Hydraulic lift and tolerance to salinity of semiarid species: consequences for species interactions. *Oecologia*, 162:11-21.
- Asbjornsen, H.; Mora, G.; Helmers, M.J., 2007. Variation in water uptake dynamics among contrasting agricultural and native plant communities in the Midwestern U.S. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 121:343-356.
- Bayala, J.; Heng, L.K.; Noordwijk, M.; Jean, S., 2008. Hydraulic redistribution study in two native tree species of agroforestry parklands of West African dry savanna. *Acta Oecologica*, 34:370-378.
- Burgess, S.S.O.; Adams, M.A.; Turner, N.C.; Ward, B., 2000. Characterization of hydrogen isotope profiles in an agroforestry system: implications for tracing water sources of trees. *Agricultural Water Management*, 45:229-241.
- Caldwell, M.M.; Dawson, T.E.; Richards, J.H., 1998. Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants. *Oecologia*, 113:151-161.
- Campanha, M.M.; Araujo, F.S.; Menezes, M.O.; Silva, V.M.A.; Medeiros, H.R., 2011. Structure of plantcommunity of shrubs and trees in agrosilvopasture system, in Sobral – CE. *Revista Caatinga*, 24:94-101.

- Coutinho, R.P.M.; Carreira, C.; Almeida, A.M.; Soares, M.C.R.; Vieira, M.R.; Carvalho, J.V., 1996. Estudo isotópico dos sistemas aquíferos do Maciço das Sete Cidades, S. Miguel – Resultados preliminares. *Revista Recursos Hídricos*, 7:25-32.
- Dawson, T.E., 1996. Determining water use by trees and forests from isotopic, energy balance and transpiration analyses: The roles of tree size and hydraulic lift. *Tree physiology*, 16:263-272.
- Dawson, T.E.; Mambelli, S.; Plamboeck, A.H.; Templer PH, Tu KP (2002) Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33:507-559.
- Durand, J.L.; Bariac, T.; Ghesquière, M.; Biron, P.; Richard, P.; Humphreys, M.; Zwierzykowski, Z., 2007. Ranking of the depth of water extraction by individual grass plants, using natural ^{18}O isotope abundance. *Environmental and Experimental Botany*, 60:137-144.
- Ehleringer, J.R.; Dawson, T.E.; 1992. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant Cell & Environment*, 15:1073–1082.
- Ehleringer, J.R.; Phillips, S.L.; Schuster, W.S.; Sandquist, D.R., 1991. Differential utilization of summer rains by desert plants. *Oecologia*, 88:430-434.
- Ehleringer, J.R.; Osmond, C.B., 1989. Stable isotopes, pp. 281-300. In: Plant physiological ecology field methods and instrumentation.(Pearcy, R.W.; Ehleringer, J.R.; Mooney, H.A.; Rundel, P.W., eds). London: Chapman and Hall Ltd.
- Gao, Y.; Duan, A.; Qiu, X.; Liu, Z.; Sun, J.; Jzhang. J.; Wang, H., 2010. Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system. *Agriculture Water Management*, 98:199-212.
- Guswa, A.J.; Celia, M.A.; Rodriguez-Iturbe, I., 2004. Effect of vertical resolution on predictions of transpiration in water-limited ecosystems. *Advances in Water Resources*, 27:467-480.
- Hirota, I.; Sakuratani. T.; Sato, T.; Higuchi, H.; Nawata, E., 2004. A split-root apparatus for examining the effects of hydraulic lift by trees on the water status neighbouring crops. *Agroforestry Systems*, 60:181-187.
- Horita, J.; Kendall, C., 2004. Stable isotope analysis of water and aqueous solutions by conventional Dual-Inlet Mass Spectrometry, pp. 1-37. In: Handbook of stable isotopes analytical techniques (Groot, P.A., ed), v. 1. Elsevier.
- Horton, J.J.; Hart, S.C., 1998. Hydraulic lift: a potentially important ecosystem process. *Trends in Ecology & Evolution*, 13:232-235.

Hsieh, J.C.C.; Chadwick, O.A.; Kelly, E.F.; Savin, S.M., 1998. Oxygen isotopic composition of soil water: Quantifying evaporation and transpiration. *Geoderma*, 82:269-29.

Jackson, P.C.; Cavelier, J.; Goldstein, G.; Meinzer, F.C.; Holbrook, N.M., 1995. Partitioning of water resources among plants of a lowland tropical forest. *Oecologia*, 101:197-203.

Jackson, N.A.; Wallace, J.S.; Ong, C.K., 2000. Tree pruning as a means of controlling water use in an agroforestry system in Kenya. *Forest Ecology and Management*, 126:133-148.

Lagergren, F.; Lindroth, A., 2002. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 112:67-85.

Lehmann, J.; Peter, I.; Steglich, C.; Gebauer, G.; Huwe, B.; Zech, W., 1998. Below-ground interactions in dryland agroforestry. *Forest Ecology and Management*, 111:157-169.

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

Lott, J.E.; Khan, A.A.H.; Black, C.R.; Ong, C.K., 2003. Water use in a *Grevillea robusta*–maize overstorey agroforestry system in semi-arid Kenya. *Forest Ecology and Management*, 180:45-59.

Lott, J.E.; Ong, C.K.; Black, C.R., 2009. Understorey microclimate and crop performance in a *Grevillea robusta*-based agroforestry system in semi-arid Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149:1140-1151.

Mahmood, R.; Hubbard, K.G., 2003. Simulating sensitivity of soil moisture and evapotranspiration under heterogeneous soils and land uses. *Journal of Hydrology*, 280:72-90.

Maia, S.M.; Xavier, F.A.; Oliveira, T.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J.A., 2007. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. *Agroforestry Systems*, 71:127-138.

Mathuva, M.N.; Rao, M.R.; Smithson, P.C.; Coe, R., 1998. Improving maize (*Zea mays*) yields in semiarid highlands of Kenya: agroforestry or inorganic fertilizers? *Field Crops Research*, 55:57-72.

Mati, R.; Kotorová, D.; Gomboš, M.; Kandra, B., 2011. Development of evapotranspiration and water supply of clay–loamy soil on the East Slovak Lowland. *Agricultural Water Management*, 98:1133-1140.

- Mestas-Valero, R.M.; Miras-Avalos, J.M.; Vidal-Vazquez, E., 2012. Estimation of the daily water consumption by maize under Atlantic climatic conditions (A Coruna, NW Spain) using Frequency Domain Reflectometry - a case study. *Natural Hazards and Earth Systems*, 12:709-714.
- Moco, M.K.; Gama-Rodrigues, E.F.; Gama-Rodrigues, A.C.; Machado, R.C.R.; Baligar, V.C., 2009. Soil and litter fauna of cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*, 76:127-138.
- Moreira, M.Z.; Sternberg, L.S.L.; Nepstad, D.C., 2000. Vertical patterns of soil water uptake by plants in a primary forest and an abandoned pasture in the eastern Amazon: an isotopic approach. *Plant and Soil*, 222:95-107.
- Moreira, M.Z.; Scholz, F.G.; Bucci, S.J.; Sternberg, L.S.; Goldstein, G.; Meinzer, F.C.; Franco, A.C., 2003. Hydraulic lift in a neotropical savanna. *Functional Ecology*, 17:573-581.
- Novák, V.; Hortalová, T.; Matejka, F., 2005. Predicting the effects of soil water content and soil water potential on transpiration of maize. *Agricultural Water Management*, 76:211-223.
- Panda, R.K.; Behera, S.K.; Kashyap, P.S., 2004. Effective management of irrigation water for maize under stressed conditions. *Agricultural Water Management*, 66:181-203.
- Radersma, S.; Ong, C.K., 2004. Spatial distribution of root length density and soil water of linear agroforestry systems in sub-humid Kenya: implications for agroforestry models. *Forest Ecology and Management*, 188:77-89.
- Reynolds, P.E.; Simpson, J.A.; Thevathasan, N.V.; Andrew, M.G., 2007. Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in Southern Ontario, Canada. *Ecological Engineering*, 29:362-371.
- Romero-Saltos, H.; Sternberg, L.D.S.L.; Moreira, M.Z.; Nepstad, D.C., 2005. Rainfall exclusion in an eastern amazonian forest alters soil water movement and depth of water uptake. *American Journal of Botany*, 92:443-455.
- Sekiya, N.; Yano, K., 2002. Water acquisition from rainfall and groundwater by legume crops developing deep rooting systems determined with stable isotope compositions of xylem waters. *Field Crops Research*, 78:133-139.
- Sumayao, C.R.; Kanemasu, E.T.; Hodges, T., 1977. Soil moisture effects on transpiration and net carbon dioxide exchange of sorghum. *Agricultural Meteorology*, 18:401-408.
- Walker, G.; Brunel, J.P.; Dighton, J.; Holland, K.; Leaney, F.; Mcewan, K.; Mensforth, L.; Thorburn, P.; Walker, C., 2001. The use of stable isotopes of water for

determining sources of water for plant transpiration, pp. 57–89. In: Stable isotope techniques in the study of biological processes and functioning of ecosystems (Unkovich, M.; Pate, J.; Mcneill, A.; Gibbs, D.J., eds). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Walker, C.D.; Richardson, S.B., 1991. The use of stable isotopes of water in characterising the source of water in vegetation. *Chemical Geology*, 94:145-158.

Woodward, F.I.; Lomas, M.R.; Kelly, C.K., 2004. Global climate and the distribution of plants biomes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 359:1465-1476.

Yang, Q.; Xiao, H-L.; Zhao, L-J.; Xiao, S-C.; Zhou, M-X.; Li, C-Z.; Zhao, L., 2010. Research progress on water uptake through foliage. *Acta Ecologica Sinica*, 30:172-177.

Zand, E.; Soufizadeh, S.; Eskandari, A., 2006. Water stress and nitrogen limitation effects on corn (*Zea mays* L.) competition with a C3 and a C4 weed. *Communications in Agriculture and Applied Biological Sciences*, 71:753-60.

Zhang, C.; Zhang, J.; Zhao, B.; Zhu, A.; Zhang, H.; Huang, P.; Li, X., 2011. Coupling a two-tip linear mixing model with a $\delta D-\delta^{18}O$ plot to determine water sources consumed by maize during different growth stages. *Field Crops Research*, 123:196-205.

CAPÍTULO 5

(Applied Vegetation Science)

ALTERAÇÕES AMBIENTAIS E FISIOLÓGICAS EM *Cordia oncocalyx* EM SISTEMA AGROFLORESTAL NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Resumo – As características físicas do ambiente podem diferir entre áreas com distintas densidades de árvores e estas podem ter seus processos fisiológicos alterados em decorrência dessas diferenças. Os objetivos deste estudo foram comparar variáveis ambientais entre áreas de floresta (MS) e sistema agrossilvipastoril (AGP) e investigar a influência dessas variáveis sobre a fotossíntese líquida do pau-branco (*Cordia oncocalyx*), para verificar a hipótese de que diferenças nos parâmetros físicos do ambiente entre sistema agrossilvipastoril e mata secundária levam a diferenças na fotossíntese do pau-branco. As variáveis precipitação pluviométrica, temperaturas do ar (T_a) e do solo (T_s5cm), umidade relativa do ar (URAr), radiação fotossinteticamente ativa (RFA), umidade do solo em duas profundidades (U_s30cm and U_s50cm) e velocidade dos ventos (V_v) foram simultaneamente registradas em uma estação automática. A fotossíntese líquida (A) foi registrada por um analisador de gás infravermelho, nos meses de fevereiro a setembro. Houve diferenças nas variáveis físicas do ambiente entre MS e AGP, com os resultados mais extremos neste último. No entanto, a fotossíntese foi maior nas plantas do AGP ao início da estação seca, quando V_v , RFA and T_s5cm foram maiores e a U_s50cm foi menor nesse sistema. As diferentes densidades de árvores entre AGP e MS levaram a diferenças nos parâmetros físicos do ambiente, todavia estes pouco influenciaram a fotossíntese nas árvores de pau-branco no período chuvoso. No período seco todos os parâmetros físicos avaliados tiveram influência sobre a fotossíntese na MS, mas não no AGP, indicando certa independência das plantas neste sistema.

Palavras-chave: Precipitação pluviométrica. Temperatura do ar. Temperatura do solo. Umidade do solo. Radiação fotossinteticamente ativa. Fotossíntese.

ENVIRONMENT AND PLANT PHYSIOLOGICAL CHANGES IN AGROFORESTRY SYSTEM ON BRAZILIAN SEMIARID

Abstract - The physical characteristics of the environment can differ among areas with different densities of trees and they may have altered their physiological processes due to these differences. The objectives of this study were to compare environmental variables between forest area (MS) and agrosilvopastoral system (AGP) and investigate the influence of these variables on net photosynthesis of *C. oncocalyx*. We hypothesized that differences in the physical parameters of the environment among agrosilvopastoral system and secondary forest lead to differences in *C. oncocalyx* photosynthesis. Rainfall, air temperature (T_a), soil temperature (T_{s5cm}), air relative humidity (URAr), photosynthetically active radiation (RFA), soil moisture (U_{s30cm} and U_{s50cm}) and wind velocity (Vv) were simultaneously recorded by an automatic weather station. The net photosynthesis (A) was recorded by an infrared gas analyzer in the February to September months. There were differences in the physical variables of the environment between secondary forest and agrosilvopastoral system, with the more extreme results in latter. Nevertheless, photosynthesis was greater in agrosilvopastoral system plants at the beginning of the dry season, when Vv, RFA and T_{s5cm} were greater and U_{s50cm} was lower in this system. The different densities of trees between AGP and MS led to differences in the physical parameters of the environment, however they had little influence on photosynthesis in *C. oncocalyx* trees in the rainy season. In the dry season all physical parameters were influential on photosynthesis in MS but not in AGP, indicating some independence of the plants in this system.

Keywords: Rainfall. Air temperature. Soil temperature. Soil moisture. Photosynthetically active radiation. Photosynthesis.

1 INTRODUÇÃO

Sistemas agroflorestais (SAFs) são uma forma potencial de uso sustentável da terra, que combina árvores e arbustos com culturas agrícolas e/ou pecuária a fim de aumentar e diversificar a exploração agrícola e a produção florestal e ao mesmo tempo conservar os recursos naturais (Rasul; Thapa, 2006). Esses sistemas diferem das florestas basicamente devido à densidade de árvores, por conseguinte, no grau de fechamento do dossel e cobertura do solo, comumente menores nos SAFs.

Diferentes densidades de árvores, em decorrência de distintos usos da terra, levam a alterações nos padrões de precipitação, logo, na quantidade de água que chega ao solo, e afetam o nível de umidade do mesmo. Assim, áreas com maior grau de cobertura do solo, como o que ocorre em florestas, estão diretamente relacionadas à mitigação da variabilidade no microclima e da umidade do solo (Lin, 2007). Contrariamente, a extração de madeira abre o dossel e expõe o solo à ação direta da luz solar, o que pode aumentar as temperaturas e reduzir a umidade do solo (Brooks; Kyker-Snowman, 2008).

O grau de fechamento do dossel em um ambiente afeta a quantidade de luz que por ele passa, propiciando diferentes níveis de incidência luminosa sobre as espécies que nele vegetam. Assim, um dossel mais aberto, como ocorre em SAFs, permite maior passagem de radiação e possibilita o acesso por uma maior quantidade de plantas. Por outro lado, um dossel mais fechado, como acontece em matas e florestas, diminui a radiação sob ou entre a copa das árvores mais altas, podendo levar às plantas a adaptarem-se para manter seus processos fisiológicos (Will *et al.*, 2001; Wittmann *et al.*, 2001).

Os processos fisiológicos em vegetais, como a fotossíntese, condutância estomática e transpiração, estão intimamente relacionados às condições físicas do ambiente. A fotossíntese, processo pelo qual as plantas fixam o carbono do CO₂ do ar e o incorporam em substâncias necessárias à sua manutenção e desenvolvimento, é dependente da incidência solar (densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos) que recebe (Robakowski *et al.*, 2004). O controle do aparato estomático é concomitantemente influenciado por fatores internos e

externos às plantas, entre estes, radiação fotossinteticamente ativa incidente, déficit de pressão de vapor, temperatura do ar e umidade do solo (Matsumoto *et al.*, 2005; Patterson *et al.*, 2000). Oscilações em tais parâmetros, como as que acontecem entre as estações do ano, são refletidas nas plantas, aumentando ou reduzindo as trocas gasosas. Adicionalmente, características físicas e químicas de ambientes distintos podem afetar diferenciadamente os processos fisiológicos em uma mesma espécie (Santos *et al.*, 2013).

Cordia oncocalyx, uma espécie endêmica da região semiárida do Nordeste do Brasil (Silveira *et al.*, 2005), apresenta emissão de folhas, floração e frutificação durante a estação chuvosa e caducifolia e dispersão de frutos na estação seca. Pesquisas recentes (Costa; Araújo, 2012) indicam a necessidade de inclusão das caatingas com dominância de *C. oncocalyx* como um subtipo das caatingas florestais classificadas por Andrade-Lima (1981). Em áreas de floresta na região semiárida brasileira, *C. oncocalyx* pode alcançar densidades de até 4.200 plantas por hectare, as quais permitem que cerca de 6% e 5% de densidade de fluxo de fótons incidentes alcancem o sub-bosque (1,3 m acima do solo) e o solo, respectivamente (Silveira *et al.*, 2012). Silveira *et al.* (no prelo) observaram ajustes em *C. oncocalyx* quanto ao início, duração, sincronia e intensidade das fenofases reprodutiva e vegetativa em resposta a variações interanuais na precipitação pluviométrica, indicando plasticidade fenotípica, o que pode conferir uma vantagem adaptativa desta espécie a períodos de baixa disponibilidade hídrica.

Os efeitos do manejo agroflorestal sobre as plantas cultivadas (Wick *et al.*, 2000; Pérez-Marin *et al.*, 2007) e sobre a qualidade do solo no semiárido brasileiro (Aguiar *et al.*, 2006; Maia *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2011) são conhecidos, entretanto, pouco se sabe a respeito das alterações nos parâmetros físicos do ambiente e sobre processos fisiológicos em árvores promovidas por sistemas agroflorestais em comparação com áreas de floresta. Para verificar a hipótese de que a menor densidade de árvores promove diferenças nas variáveis climatológicas do sistema agrossilvipastoril e que isso leva a diferenças na fotossíntese do pau-branco, objetivou-se comparar variáveis ambientais entre uma área de mata secundária e um sistema agrossilvipastoril e avaliar a influência dessas variáveis sobre a fotossíntese líquida do pau-branco (*Cordia oncocalyx*).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Áreas de estudo

O estudo foi desenvolvido na Fazenda Crioula, pertencente ao Centro Nacional de Pesquisa de Caprinos e Ovinos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Caprinos e Ovinos, no município de Sobral (3°41' S e 40°20' W), Ceará, Brasil. A temperatura e a precipitação médias anuais são de 30 °C e 821,6 mm, respectivamente (IPECE, 2005), com predomínio de estações secas que duram sete ou oito meses (junho a janeiro) e uma curta estação chuvosa (janeiro a maio). O clima é semiárido, classificado como BSw'h', de acordo com Köppen, muito quente, com as principais chuvas ocorrendo no outono. A classe de solos predominante na área de estudo é o Luvissole Crômico Órtico típico (Aguiar *et al.*, 2006). A vegetação predominante na região é um tipo de savana lenhosa (Woodward *et al.*, 2004), regionalmente conhecida como Caatinga, que consiste principalmente de espécies decíduas que perdem suas folhas durante a estação seca (Araújo; Tabarelli, 2002).

Na fazenda, desde 1997, um experimento de longo prazo tem sido conduzido para avaliar alternativas de sistemas agroflorestais (agrossilvipastoril e silvipastoril) aos tradicionais (corte-e-queima da vegetação), tendo uma área com vegetação nativa (mata secundária) utilizada como testemunha. Para este estudo, selecionou-se duas das áreas avaliadas pela Embrapa Caprinos e Ovinos, cujas características principais são:

- Sistema agrossilvipastoril (AGP): área com 1,6 ha onde foi adotado o cultivo em aléias, com faixas de 3,0 m de largura, cultivando-se milho (*Zea mays* L.) e/ou sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) intercalado por fileiras de leucena [*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit], implantadas com espaçamento de 0,5 m entre plantas. Esse sistema consiste de, aproximadamente, 200 árvores por hectare, correspondendo a 22% de cobertura do solo. Não há aplicação de fertilizantes e todas as práticas culturais são feitas manualmente. Ovinos e caprinos têm acesso à área para se alimentar após a colheita do cultivo.

- Mata secundária (MS): corresponde a uma área com 1,6 ha de Caatinga arbórea, com vegetação secundária de, aproximadamente, 50 anos.

O AGP e a MS possuem, respectivamente, cerca de 1.300 e 2.600 indivíduos com altura ≥ 1 m e diâmetro ao nível do solo ≥ 3 cm por hectare, apresentando nove espécies arbóreas, das quais quatro são comuns: *Cordia oncocalyx* Allemão, *Mimosa caesalpinifolia* Benth., *Poincianella bracteosa* (Tul.) L.P. Queiroz e *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud. (Campanha *et al.*, 2011).

2.2 Variáveis climatológicas

Os dados climatológicos foram obtidos em duas estações meteorológicas (Campbell Scientific, INC, Utah, USA) instaladas nas áreas do AGP e na MS. Foram acoplados às estações sensores de umidade do solo a 30 e 50 cm de profundidade, temperatura do solo a 5 cm de profundidade, velocidade dos ventos, temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação fotossinteticamente ativa. As leituras pelos sensores eram realizadas a cada 30 segundos e a média registrada a cada 15 minutos em dispositivos de armazenamento de dados. Os registros foram feitos no período de 1º de janeiro a 20 de outubro de 2011, sendo considerados todos os valores diários para cálculo das médias mensais, exceto para a radiação fotossinteticamente ativa, cujos valores registrados entre 18h e 6h foram excluídos, por serem muito baixos e alterarem a representatividade das médias.

Dois pluviômetros, um em cada área, igualmente conectados às estações, registraram o total de precipitação a cada 15 minutos em dispositivos de armazenamento de dados. Os valores de precipitação apresentados consistem no somatório de todos os eventos de chuva dentro de um mês, entre os meses de fevereiro a outubro.

2.3 Fotossíntese em *Cordia oncocalyx*

Cordia oncocalyx Allemão (pau-branco), Boraginaceae, é uma espécie abundante no estado do Ceará e dominante nas áreas de estudo, com frequência de 49,1% na MS e 50% no AGP (Campanha *et al.*, 2008; Carvalho, 2008) e com abundância de 670 e 80 indivíduos por hectare na MS e no AGP, respectivamente (Aguiar *et al.*, em preparo).

A fotossíntese líquida foi registrada com auxílio de um analisador de gás infravermelho (IRGA) (LI-6400XT, LI-COR Biosciences, USA), utilizando-se três

folhas apicais em três árvores por sistema. As árvores foram selecionadas por semelhanças no diâmetro do caule. Torres foram montadas com andaimes em altura semelhante à das plantas (entre oito e nove metros de altura). Os registros foram feitos entre 9h e 10h, nos meses de fevereiro a setembro, uma vez por mês. A temperatura do ar e a radiação fotossinteticamente ativa, simultaneamente à fotossíntese, foram registradas pelo IRGA, e utilizadas nos testes de regressão linear por representarem os valores nos momentos exatos das trocas gasosas.

2.4 Análises estatísticas

O teste t de Student, com probabilidade de 5%, foi utilizado para verificar a existência de diferenças entre as médias dos dados climatológicos dos dois sistemas avaliados, em cada mês. A fotossíntese líquida do pau-branco é apresentada através de estatística descritiva (média \pm erro padrão), em gráfico de linhas construído com o software Microcal Origin™ (1997).

Uma matriz de correlação linear foi construída para verificar as relações entre os parâmetros: precipitação (Prec.), temperatura média do ar (T_a), umidade relativa do ar (URAr), velocidade dos ventos (V_v), radiação fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura do solo a 5 cm de profundidade (T_{s5cm}), umidade gravimétrica do solo a 30 e 50 cm (U_{s30cm} e U_{s50cm} , respectivamente) e fotossíntese. As regressões lineares múltiplas foram obtidas considerando como variável dependente a fotossíntese de *C. oncocalyx* e como variáveis independentes as climatológicas, distinguindo-se meses chuvosos e secos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Variáveis climatológicas

A precipitação registrada de fevereiro a julho pelas estações meteorológicas somou 845,6 mm no AGP e 685,2 mm na MS, o que permite inferir que houve uma redução de 19% na quantidade de chuva que ultrapassou o dossel na MS em relação ao AGP, em decorrência da densidade de árvores. Pesquisas apontam que a interceptação da água da chuva pela copa das árvores pode chegar a 60% do total precipitado e que esse percentual pode oscilar para menos em

função da densidade de árvores do sistema (Guevara-Escobar *et al.*, 2007; Poppenborg; Hölscher, 2009; Siles *et al.*, 2010). Todavia, devido ao alto valor registrado no mês de abril para a MS (Tabela 5.1), não se pode desprezar que as diferenças pluviométricas sejam resultantes de diferenças geográficas, uma vez que, em microescala, pode haver variações espaciais na distribuição das chuvas (Shachnovich *et al.*, 2008; Santos-Silva; Lucio, 2012).

O AGP apresentou maiores valores de temperatura do ar nos meses chuvosos (Tabela 5.1). As variações de temperaturas diárias e sazonais entre ambientes próximos podem ser reflexo de diferenças na cobertura vegetal (Bueno *et al.*, 2012; Ohashi *et al.*, 2012). Assim, com a queda das folhas nos meses secos (agosto a outubro), a T_a tornou-se estatisticamente semelhante entre os sistemas. A rápida emissão de folhas no início do período chuvoso promoveu redução na T_a superior a seis graus entre janeiro e fevereiro na MS, porém, no AGP, cuja densidade de árvores é menor, o efeito das chuvas sobre a temperatura aliado ao das árvores ocorreu apenas entre fevereiro e março, levando à redução na T_a superior a quatro graus.

A umidade relativa do ar (URAr) foi maior na MS de fevereiro a julho e apresentou aumentos progressivos no AGP entre janeiro e março e bruscos na MS entre janeiro e fevereiro (Tabela 5.1). Na transição período chuvoso/seco para o pleno período seco também foi observada situação semelhante com forte redução da URAr na MS (21,4%), enquanto no AGP a redução no respectivo período foi de 18,7%, o que fez com que ambos os sistemas apresentassem valores semelhantes de agosto a outubro, período em que as plantas estavam desprovidas de folhagem nas duas áreas avaliadas. Tal fato evidencia que a URAr é fortemente influenciada pela densidade da vegetação, o que é confirmado por estudos realizados por Von Arx *et al.* (2012), ao observarem que florestas latifoliadas (dossel fechado, com alto índice de área foliar-IAF) apresentaram maior URAr do que aquelas que possuíam baixo IAF.

Tabela 5.1. Precipitação pluviométrica, temperatura média do ar (T_a), umidade relativa do ar (URAr), velocidade dos ventos (V_v), radiação fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura do solo a 5 cm de profundidade (T_s5cm), umidade volumétrica do solo a 30 cm (U_s30cm) e 50 cm (U_s50cm) de profundidade em sistema agrossilvipastoril (AGP) e mata secundária (MS), entre os meses de janeiro e outubro de 2011, Fazenda Crioula, Sobral-CE, Brasil

Parâmetros	Sistema	Meses									
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
		Início do período chuvoso	Pleno período chuvoso				Final período chuvoso	Transição chuvoso/seco		Pleno período seco	
Precipitação (mm)	AGP	-	185,0	193,3	155,2	165,6	71,6	74,9	0	0	0
	MS	-	134,4	155,7	207,5	94,5	51,8	41,4	0	0	0
T_a (°C)	AGP	30,3*	29,8*	25,5*	25,5*	25,8*	25,4*	25,6*	27,4	28,7	28,9
	MS	31,2	24,8	25,1	24,7	25,1	24,7	25,0	27,3	28,9	29,2
URAr (%)	AGP	61,3*	65,9*	83,5*	83,9*	83,8*	80,8*	74,9*	60,9	53,4	56,1
	MS	57,3	86,5	86,4	89,7	88,3	85,1	78,2	61,5	53,4	56,2
V_v ($m\ s^{-1}$)	AGP	0,88*	0,83*	0,32*	0,29*	0,21*	0,30*	0,35*	0,62*	0,91*	1,30*
	MS	0,53	0,13	0,12	0,09	0,07	0,09	0,14	0,36	0,59	0,76
RFA ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)	AGP	1137*	682*	525*	570*	464*	453*	495*	636*	728*	657*
	MS	781	68	84	36	43	45	72	147	378	418
$T_s 5cm$ (°C)	AGP	28,5*	28,1*	27,9*	26,6*	26,3	26,3*	26,9*	30,1*	32,9*	34,3*
	MS	26,7	26,1	26,0	25,9	26,1	25,6	25,7	27,8	30,6	31,9
U_s30cm ($m^3\ m^{-3}$)	AGP	0,28*	0,37*	0,45*	0,49*	0,47	0,37	0,32	0,25	0,24	0,23
	MS	0,39	0,41	0,48	0,52	0,46	0,38	0,31	0,27	0,25	0,24
U_s50cm ($m^3\ m^{-3}$)	AGP	0,12*	0,37*	0,41*	0,41*	0,39*	0,33*	0,25*	0,19*	0,18*	0,17*
	MS	0,49	0,48	0,52	0,56	0,52	0,43	0,37	0,33	0,31	0,30

- sem dados; * médias diferem (entre ambientes) pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.

A velocidade do vento, classificada como calma ($0-0,2 \text{ m s}^{-1}$) ou aragem ($0,3-1,5 \text{ m s}^{-1}$) de acordo com a escala Beaufort, foi maior no AGP em todos os meses de estudo (Tabela 5.1), o que pode ser resultado direto da densidade de árvores no sistema. Áreas com elevada densidade ($\approx 400 \text{ árv ha}^{-1}$) podem ter a V_v reduzida em até 78%, quando comparadas a áreas sem árvores (Hawke; Wedderburn, 1994). A velocidade dos ventos afeta o fluxo de seiva, que reflete a entrada de água na planta (Ma *et al.*, 2012), influenciando de forma direta a atividade estomática e, por conseguinte, interferindo no processo fotossintético.

A radiação fotossinteticamente ativa que ultrapassou o dossel também foi maior no AGP durante todo o período de estudo (Tabela 5.1). Pesquisas desenvolvidas por Silveira *et al.* (2012) mostram que, no período chuvoso, em áreas de floresta dominada por *C. oncocalyx*, apenas cerca de 5% da radiação incidente chega ao solo. Um dossel mais aberto permite maior incidência de radiação solar chegando ao solo, aumentando a regeneração de plantas nativas e possibilitando o desenvolvimento de outras espécies, o que consequentemente aumenta a diversidade local (Lemenih *et al.*, 2004; Schweitzer; Dey, 2011). No período chuvoso, as diferenças na RFA entre AGP e MS foram da ordem de 10 vezes. No início do período seco, apesar de ambos os sistemas apresentarem menor quantidade de folhas, a radiação registrada no AGP ainda foi maior, como reflexo da menor quantidade de árvores nesse sistema.

Plantas latifoliadas, como *C. oncocalyx*, têm baixa transmitância da radiação, levando a reduções na temperatura sob o dossel (Yirdaw; Luukkanen, 2004), o que explica a menor temperatura registrada no horizonte superficial do solo da MS (Tabela 5.1). A T_s mostrou-se mais constante na MS em relação à do AGP, haja vista as diferenças entre a maior e a menor $T_{s5\text{cm}}$ nos meses chuvosos terem sido de apenas $1,1 \text{ }^\circ\text{C}$ na MS e de $2,2 \text{ }^\circ\text{C}$ no AGP. Nos três primeiros meses sem chuva (agosto-outubro) a $T_{s5\text{cm}}$ foi, em média, $2,3 \text{ }^\circ\text{C}$ maior no AGP que na MS. A temperatura do solo, bem como os demais parâmetros físicos observados, pode afetar significativamente a fotossíntese em plantas arbóreas, caso estas não desenvolvam adaptações (Dang; Cheng, 2004). Todavia, em plantas de Caatinga, onde o custo de manter as folhas sob condições tão adversas como as que ocorrem

no período seco é alto, a melhor adaptação para a maioria sobreviver a esse período é a perda de folhas.

A umidade do solo a 30 cm de profundidade (U_{s30cm}) foi menor no AGP do que na MS de janeiro a abril (Tabela 5.1). É conhecido que áreas com diferentes densidades de cobertura vegetal apresentam diferentes taxas de evapotranspiração (Giambelluca *et al.*, 2009), porém, tendo em vista que, a partir de maio, os dois sistemas apresentam teores de umidade gravimétrica semelhantes, não se pode atribuir as diferenças exclusivamente à densidade das espécies arbóreas dominantes. É possível que o cultivo e a ocorrência de maior cobertura de plantas espontâneas no AGP absorvam maior quantidade de água do solo, uma vez que, após a colheita do milho, que ocorreu em meados de maio, os dois sistemas passaram a ter valores de umidade semelhantes.

Aos 50 cm de profundidade (U_{s50cm}), o AGP apresentou menor umidade do solo durante todo o período de avaliação (Tabela 5.1), de forma que a MS chega a apresentar quase duas vezes o valor registrado no AGP, durante os três primeiros meses secos, e quatro vezes mais no mês de janeiro. Tendo o conteúdo de água no solo variação espacial e temporal de acordo com a densidade de raízes (Schwärzel *et al.*, 2009) e considerando que a absorção de água pelas plantas gera uma zona de depleção próxima à região de maior densidade de raízes (Balieiro *et al.*, 2005), é possível que no AGP algumas espécies estejam absorvendo água em grande quantidade nessas camadas mais profundas. Todavia, pesquisas que relacionem as zonas de absorção das espécies dominantes e variações na umidade do solo entre profundidades considerando essas áreas diferentemente manejadas são necessárias para confirmar essa hipótese.

3.2 Fotossíntese líquida em *Cordia oncocalyx*

As árvores de *C. oncocalyx* apresentaram fotossíntese líquida (A) semelhante entre os dois sistemas em pleno período chuvoso (Figura 5.1). Porém, em fevereiro, início do período chuvoso, as plantas do AGP exibiram maior A , mesmo sob condições ambientais mais adversas do que as da MS, como T_a e T_{s5cm} maiores e $URAr$, U_{s30cm} e U_{s50cm} menores (Tabela 5.1). As maiores taxas de A , em ambos os sistemas, foram registradas entre abril e julho, quando as

variáveis climatológicas incluíam: T_a mais amena, URAr elevada, V_v menor, RFA baixa, T_{s5cm} menor e boa umidade no solo (médias para o período de 25,6 e 24,9 °C; 80,8 e 85,3%; 0,29 e 0,10 $m\ s^{-1}$; 495,5 e 49,0 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$; 26,5 e 25,8 °C; 0,41 e 0,42 $m^3\ m^{-3}$, no AGP e na MS, respectivamente). As menores taxas de A foram registradas no início do período chuvoso e na transição período chuvoso/seco, com a menor média registrada na MS, em pleno período seco (setembro), quando as condições climáticas eram mais extremas (ausência de precipitação, temperaturas do ar e do solo mais elevadas e baixas URAr e umidade do solo).

As folhas de *C. oncocalyx* recém-produzidas no início da estação chuvosa alcançam a maturidade por volta do mês de abril quando passam a exibir maior fotossíntese. Com a proximidade da senescência as folhas começam a reduzir a capacidade fotossintética. Esses resultados estão de acordo com observações feitas por Muthuri *et al.* (2009) que registraram menor taxa de assimilação líquida de carbono em folhas juvenis e senescentes. Apesar disso, nos meses iniciais da estação seca (agosto e setembro) as árvores no AGP mantiveram o mesmo nível de A registrado em março, mês de chuvas intensas, enquanto as da MS atingiram os menores valores médios.

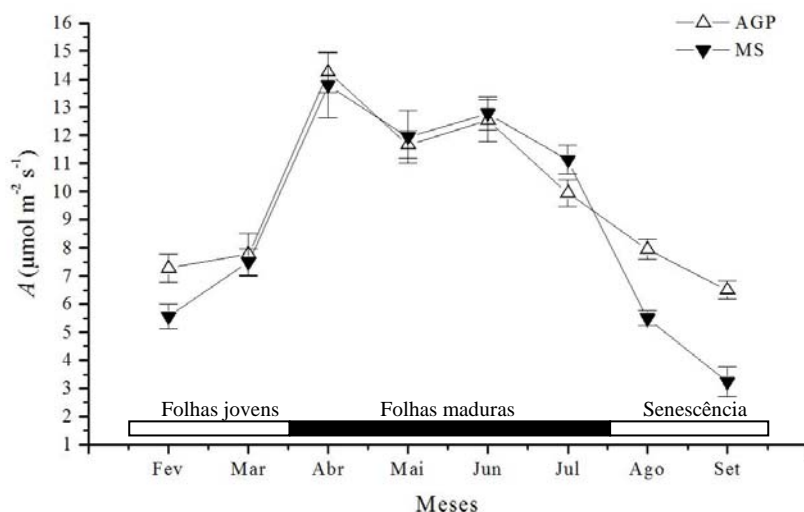


Figura 5.1. Fotossíntese líquida (A) em folhas apicais de pau-branco (*Cordia oncocalyx*), medidas entre 9 e 10h, em sistema agrossilvipastoril (AGP) e mata secundária (MS), Fazenda Crioula, Sobral-CE. $n = 9$. A barra inferior representa os estádios etários das folhas.

3.3 Relações entre variáveis climatológicas e fotossíntese

As variáveis climatológicas avaliadas não se constituem como os principais fatores atuando sobre as trocas gasosas, devido à baixa correlação das variáveis com a *A* em *C. oncocalyx* na MS e no AGP (Tabela 5.2). A *A* em *C. oncocalyx* parece depender pouco das variações nos parâmetros físicos nas áreas estudadas, haja vista que apenas a URAr na MS foi significativamente correlacionada com *A*. Estudos apontam, para essa espécie, correlação positiva entre a emissão de folhas e precipitação pluviométrica e umidade do solo (Silveira *et al.*, no prelo). Dadas essas discordâncias e devido à escassez de informações a respeito da espécie, pesquisas que comparem as taxas de fotossíntese, condutância estomática e transpiração em um gradiente de precipitação e temperatura no semiárido brasileiro podem auxiliar na verificação de existência ou não de correlação entre variáveis físicas do ambiente e trocas gasosas em *C. oncocalyx*.

Tabela 5.2. Matriz de correlação entre as médias mensais (fevereiro a setembro de 2011) das variáveis climatológicas e a fotossíntese líquida mensal em árvores de pau-branco (*Cordia oncocalyx*), em sistema agrossilvipastoril (AGP) e mata secundária (MS)

Fotossíntese líquida	Prec.	T _a	URAr	V _v	RFA	T _s 5cm	U _s 30cm	U _s 50cm
AGP	0,31	-0,67	0,65	-0,78	-0,75	-0,68	0,57	-0,39
MS	0,24	-0,67	0,82*	-0,73	-0,69	-0,70	0,45	0,46

Prec. = precipitação pluviométrica; T_a = temperatura média do ar; URAr = umidade relativa do ar; V_v = velocidade dos ventos; RFA = radiação fotossinteticamente ativa; T_s5cm = temperatura do solo a 5 cm de profundidade; U_s30cm e U_s50cm = umidade volumétrica do solo a 30 e 50 cm de profundidade, respectivamente.

* significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Pearson.

A fotossíntese diferenciada entre os sistemas, notadamente nos meses secos, levou à investigação do efeito dos parâmetros físicos considerando os meses chuvosos (fevereiro a julho) e sem chuvas (agosto e setembro) (Figuras 5.2 e 5.3). No período chuvoso, T_a, URAr, V_v e T_s5cm foram os principais fatores climatológicos que influenciaram a fotossíntese nas plantas de *C. oncocalyx* no AGP e T_a, URAr, RFA e T_s5cm na MS. URAr baixa, V_v, T_a e T_s elevadas induzem ao fechamento do aparelho estomático, conseqüentemente reduzindo a transpiração e a fotossíntese para evitar a dissecação, embora as plantas sejam mais sensíveis a umas do que a outras variáveis meteorológicas (Blonquist-Jr *et al.*, 2009). Por outro lado, temperaturas elevadas podem modificar o tamanho e a largura dos estômatos,

contribuindo para aumentos na plasticidade da condutância estomática (Sadras *et al.*, 2012). No período seco, todos os parâmetros físicos avaliados tiveram influência sobre a *A* nas plantas da MS, mas apenas V_v , RFA, U_{s30cm} e U_{s50cm} sobre aquelas do AGP, indicando uma certa independência de *C. oncoalyx* nesse sistema em relação a algumas variáveis climatológicas, sobretudo das temperaturas do ar e do solo.

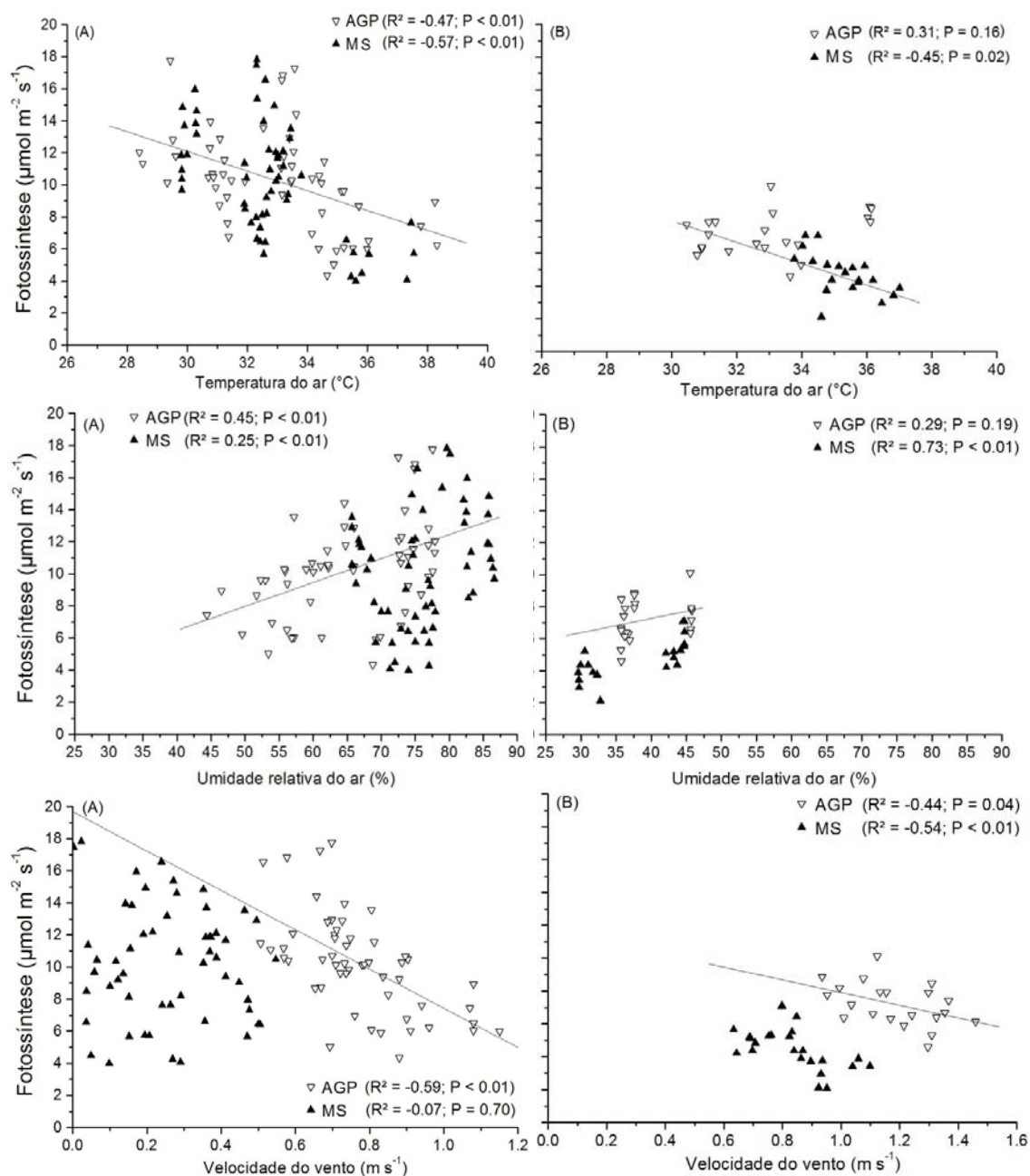


Figura 5.2. Fotossíntese líquida em folhas de *C. oncoalyx* em função da temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento em sistema agrossilvipastoril (AGP) e em mata secundária (MS) nos meses chuvosos (A) e secos (B).

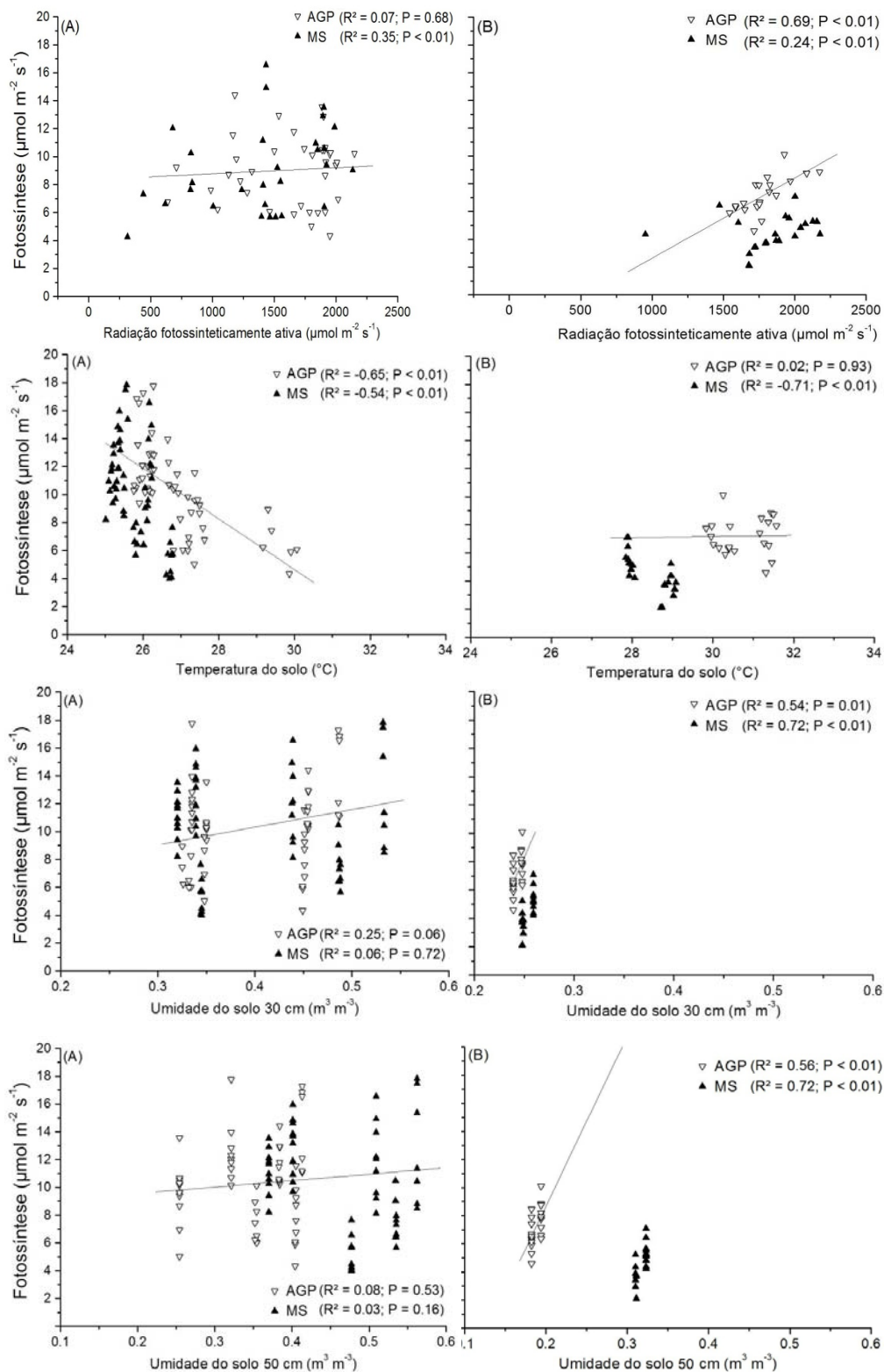


Figura 5.3. Fotossíntese líquida em folhas de *C. oncocalyx* em função da radiação fotossinteticamente ativa, temperatura do solo a 5 cm de profundidade, umidade volumétrica do solo a 30 cm e 50 cm de profundidade em sistema agrossilvipastoril (AGP) e em mata secundária (MS) nos meses chuvosos (A) e secos (B).

A fotossíntese líquida não foi dependente das variações na RFA (Figura 5.3), contrariando observações de Matsumoto *et al.* (2005) e Walcroft *et al.* (2002). De acordo com Vierling e Wessman (2000), muitos processos ecofisiológicos nas plantas não respondem linearmente a mudanças na intensidade e variabilidade temporal do fluxo de fótons fotossinteticamente ativos. Possivelmente *C. oncocalyx* tenha plasticidade fenotípica suficiente ou elevada eficiência no uso da radiação para se adaptar a extensas oscilações na incidência solar, pois apresentou níveis semelhantes de fotossíntese entre AGP e MS quando em exposição a intensidades tão distintas.

O elevado teor de umidade do solo a 30 e 50 cm de profundidade no período chuvoso não restringiu a fotossíntese líquida ($p > 0,05$, Figura 5.3). Contrariamente, a reduzida umidade do solo no período seco levou a reduções na A ($p < 0,01$). Contudo, as plantas do AGP conseguiram manter uma maior A do que as plantas da MS quando submetidas a semelhante ($U_s 30\text{cm}$) ou menor teor de água no solo ($U_s 50\text{cm}$). O menor teor de água no AGP aos 50 cm pode indicar absorção preferencial da água do solo por *C. oncocalyx* nessa profundidade levando à depleção da umidade, que, com isso, conseguiu manter seus processos fisiológicos. A menor densidade de árvores nesse sistema asseguraria essa possibilidade, o que não seria possível na MS, pois levaria a forte competição entre as árvores e, possivelmente à exclusão de alguns indivíduos. Assim, as plantas da MS adaptam-se à escassez d'água reduzindo as trocas gasosas e perdendo as folhas mais cedo do que as do AGP. De forma complementar, Dombroski *et al.* (2011) registraram que, comparada a outras espécies de Caatinga, *C. oncocalyx* possui alguma forma de armazenamento de água e desenvolvimento de estratégias para manter a fotossíntese ao longo dos 15 anos de estabelecimento do AGP. É possível que tais estratégias estejam ligadas a alterações na morfologia e/ou anatomia foliar desenvolvidas em função das condições climatológicas mais adversas no AGP, que culminaram com maior fixação de carbono nas plantas de *C. oncocalyx* em plena estação seca.

4 CONCLUSÕES

A maioria dos resultados mais extremos nas variáveis físicas, como maiores temperaturas do ar e do solo e menores umidade relativa do ar e do solo, foi observada no sistema agrossilvipastoril (AGP). As árvores de *C. oncocalyx* no AGP apresentaram maior fotossíntese líquida no início do período chuvoso e do seco, mesmo sob condições ambientais mais adversas que as da mata secundária (MS), como maiores temperatura do ar e velocidade dos ventos e menores umidades relativa do ar e do solo. No período seco a fotossíntese de *C. oncocalyx* foi menos dependente de fatores ambientais em sistema agrossilvipastoril do que em mata secundária, sugerindo que as plantas do AGP desenvolveram estratégias que culminaram em maior assimilação líquida de carbono. Embora o manejo agroflorestal tenha levado a condições ambientais mais extremas, as plantas arbóreas, em densidade menor no AGP, conseguem manter seus processos fisiológicos a taxas semelhantes ou maiores do que as plantas na MS.

REFERÊNCIAS

- Aguiar, M.I.; Maia, S.M.F.; Oliveira, T.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J.A., 2006. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. *Revista Ciência Agronômica*, 37:270-278.
- Andrade-Lima, D., 1981. The caatingas dominium. *Revista Brasileira de Botânica*, 4:149-153.
- Araújo, E.L.; Tabarelli, M., 2002. Estudos de ecologia de populações de plantas do nordeste do Brasil, pp. 135–142. In: Biodiversidade, conservação e uso sustentável da flora do Brasil (Araújo, E.L.; Moura, A.N.; Sampaio, E.S.V.B.; Gustinari, L.M.S.; Carneiro, J.M.T., eds.). Recife(PE): Imprensa Universitária.
- Balieiro, F.C.; Cedia, M.B.; Pereira, M.G.; Resende, A.S.; Franco, A.A., 2005. Biomassa de raízes e regime hídrico do solo em plantio de *Pseudosamanea guachapele* (Kunth) Harms em um Planossolo Háplico. *Floresta*, 35:221-230.
- Blonquist-Jr, J.M.; Norman, J.M.; Bugbee, B., 2009. Automated measurement of canopy stomatal conductance based on infrared temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149:1931-1945.

- Brooks, R.T.; Kyker-Snowman, T.D., 2008. Forest floor temperature and relative humidity following timber harvesting in southern New England, USA. *Forest Ecology and Management*, 254:65-73.
- Bueno, A.C.R.; Prudente, D.A.; Machado, E.C.; Ribeiro, R.V., 2012. Daily temperature amplitude affects the vegetative growth and carbon metabolism of orange trees in a rootstock-dependent manner. *Journal of Plant Growth Regulation*, 31:309-319.
- Campanha, M.M.; Aguiar, M.I.; Maia, S.M.; Oliveira, T.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J.A., 2008. *Perdas de solo, água e nutrientes pela erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo agroflorestal no semiárido cearense*. Sobral: Embrapa. Circular Técnica, 37.
- Campanha, M.M.; Araújo, F.S.; Menezes, M.O.; Silva, V.M.A.; Medeiros, H.R., 2011. Structure of plant community of shrubs and trees in agrosilvopasture system, in Sobral – CE. *Revista Caatinga*, 24:94-101.
- Carvalho, P.E.R., 2008. *Pau-branco-do-sertão (Auxemma oncocalyx)*. Colombo(PR): Embrapa Florestas. Circular Técnica, 153.
- Costa, R.C.; Araújo, F.S., 2012. Physiognomy and structure of a caatinga with *Cordia oncocalyx* (Boraginaceae), a new type of community in Andrade-Lima's classification of caatingas. *Rodriguésia*, 63:269-276.
- Dang, Q-L.; Cheng, S., 2004. Effects of soil temperature on ecophysiological traits in seedlings of four boreal tree species. *Forest Ecology and Management*, 194:379-387.
- Dombroski, J.L.D.; Praxedes, S.C.; Freitas, R.M.O.; Pontes, F.M., 2011. Water relations of Caatinga trees in the dry season. *South African Journal of Botany*, 77:430-434.
- Giambelluca, T.W.; Scholz, F.G.; Bucci, S.J.; Meinzer, F.C.; Goldstein, G.; Hoffmann, W.A.; Franco, A.C.; Buchert, M.P., 2009. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149:1365-1376.
- Guevara-Escobar, A.; González-Sosa, E.; Véliz-Chávez, C.; Ventura-Ramos, E.; Ramos-Salinas, M., 2007. Rainfall interception and distribution patterns of gross precipitation around an isolated *Ficus benjamina* tree in an urban area. *Journal of Hydrology*, 333:532-541.
- Hawke, M.F.; Wedderburn, M.E., 1994. Microclimate changes under *Pinus radiata* agroforestry regimes in New Zealand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71:133-145.

Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – IPECE, 2005. *Perfil Básico Municipal, Sobral*. Fortaleza: Secretaria do Planejamento e Coordenação (SEPLAN), Governo do Estado do Ceará.

Lemenih, M.; Gidyelew, T.; Teketay, D., 2004. Effects of canopy cover and understory environment of tree plantations on richness, density and size of colonizing woody species in southern Ethiopia. *Forest Ecology and Management*, 194:1-10.

Lin, B.B., 2007. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144:85-94.

Ma, J.X.; Chen, Y.N.; Li, W.H. Huang, X.; Zhu, C.G.; Ma, X.D., 2012. Sap flow characteristics of four typical species in desert shelter forest and their responses to environmental factors. *Environmental Earth Sciences*, 67:151-160.

Maia, S.M.; Xavier, F.A.; Oliveira, T.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J.A., 2006. Impactos de sistemas agroflorestrais e convencional sobre a qualidade do solo no semi-árido cearense. *Revista Árvore*, 30:837-848.

Matsumoto, K.; Ohta, T.; Tanaka, T., 2005. Dependence of stomatal conductance on leaf chlorophyll concentration and meteorological variables. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132:44-57.

Microcal Software Inc., 1997. Data analysis and technical graphics software. Origin Professional version 6.0. Northampton, MA.

Muthuri, C.W.; Ong, C.K.; Craigon, J.; Mati, B.M.; Ngumi, V.W.; Black, C.R., 2009. Gas exchange and water use efficiency of trees and maize in agroforestry systems in semi-arid Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 129:497-507.

Ohashi, Y.; Kawakami, H.; Shigeta, Y.; Ikeda, H.; Yamamoto, N., 2012. The phenology of cherry blossom (*Prunus yedoensis* “Somei-yoshino”) and the geographic features contributing to its flowering. *International Journal of Biometeorology*, 56:903-914.

Patterson, M.C.; Samuelson, L.; Somers, G.; Mays, A., 2000. Environmental control of stomatal conductance in forest trees of the Great Smoky Mountains National Park. *Environmental Pollution*, 110:225-233.

Pérez-Marin, A.M.; Menezes, R.S.; Salcedo, I.H., 2007. Produtividade do milho solteiro ou em aleias de glirícidia adubado com duas fontes orgânicas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42:669-677.

Poppenborg, P.; Hölscher, D., 2009. The influence of emergent trees on rainfall distribution in a cacao agroforest (Sulawesi, Indonesia). *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 204:730-736.

Rasul, G.; Thapa, G.B., 2006. Financial and economic suitability of agroforestry as an alternative to shifting cultivation: The case of the Chittagong Hill Tracts, Bangladesh. *Agricultural Systems*, 91:29-50.

Robakowski, P.; Wyka, T.; Samardakiewicz, S.; Kierzkowski, D., 2004. Growth, photosynthesis, and needle structure of silver fir (*Abies alba* Mill.) seedlings under different canopies. *Forest Ecology and Management*, 201:211-227.

Sadras, V.O.; Montoro, A.; Moran, M.A.; Aphalo, P.J., 2012. Elevated temperature altered the reaction norms of stomatal conductance in field-grown grapevine. *Agricultural and Forest Meteorology*, 165:35-42.

Santos, C.M.; Verissimo, V.; Wanderley-Filho, H.C.L.; Ferreira, V.M.; Cavalcante, P.G.S.; Rolim, E.V.; Endres, L., 2013. Seasonal variations of photosynthesis, gas exchange, quantum efficiency of photosystem II and biochemical responses of *Jatropha curcas* L. grown in semi-humid and semi-arid areas subject to water stress. *Industrial Crops and Products*, 41:203-213.

Santos-Silva, C.M.; Lúcio, P.S., 2012. Distribuição espacial da precipitação sobre o Rio Grande do Norte: estimativas via satélites e medidas por pluviômetros. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27:37-346.

Schwärzel, K.; Menzer, A.; Clausnitzer, F.; Spank, U.; Häntzschel, J.; Grünwald, T.; Köstner, B.; Bernhofer, C.; Feger, K-H., 2009. Soil water content measurements deliver reliable estimates of water fluxes: A comparative study in a beech and a spruce stand in the Tharandt forest (Saxony, Germany). *Agricultural and Forest Meteorology*, 149:1994-2006.

Schweitzer, C.J.; Dey, D.C., 2011. Forest structure, composition, and tree diversity response to a gradient of regeneration harvests in the mid-Cumberland Plateau escarpment region, USA. *Forest Ecology and Management*, 262:1729-1741.

Shachnovich, Y.; Berliner, P.R.; Bar, P., 2008. Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid zone. *Journal of Hydrology*, 349:168-177.

Siles, P.; Vaast, P.; Dreyer, E.; Harmand, J.M., 2010. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss in a coffee (*Coffea arabica* L.) monoculture compared to an agroforestry system with *Inga densiflora*. *Journal of Hydrology*, 395:39-48.

Silva, G.L.; Lima, H.V.; Campanha, M.M.; Gilkes, R.J.; Oliveira, T.S., 2011. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in Brazilian semi-arid region. *Geoderma*, 167-168:61-70.

Silveira, A.P., Araújo, E.L., Araújo, F.S., Willadino, L.G., 2005. Predação de frutos e germinação de sementes em *Auxemma oncocalyx* (Allemão) Baill. e *Auxemma glazioviana* Taub., pp. 416- 432. In: Estresses ambientais: danos e benefícios em

plantas (Nogueira, R.M.C.; Araújo, E.L.; Willadino, L.G.; Cavalcante, U.M.T., eds.). Recife(PE): MXM.

Silveira, A.P.; Martins, F.R.; Araújo, F.S., 2012. Are tree ontogenetic structure and allometric relationship independent of vegetation formation type? A case study with *Cordia oncocalyx* in the Brazilian caatinga. *Acta Oecologica*, 43:126-133.

Silveira, A.P.; Martins, F.R.; Araújo, F.S., no prelo. Do vegetative and reproductive phenophases of deciduous tropical species respond similarly to rainfall pulses? *Journal of Forestry Research*.

Vierling, L.A.; Wessman, C.A., 2000. Photosynthetically active radiation heterogeneity within a monodominant Congolese rain forest canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103:265-278.

Von Arx, G.; Dobbertin, M.; Rebetez, M., 2012. Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166–167:144-155.

Walcroft, A.S.; Whitehead, D.; Kelliher, F.M.; Arneth, A.; Silvester, W.B., 2002. The effects of long-term, partial shading on growth and photosynthesis in *Pinus radiata* D. Don trees. *Forest Ecology and Management*, 163:151-163.

Wick, B.; Tiessen, H.; Menezes, R.S.C., 2000. Land quality changes following the conversion of the natural vegetation into silvo-pastoral systems in semi-arid NE Brazil. *Plant and Soil*, 222:59-70.

Will, R.E.; Barron, G.A.; Burkes, E.C.; Shiver, B.; Teskey, R.O., 2001. Relationship between intercepted radiation, net photosynthesis, respiration, and rate of stem volume growth of *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different densities. *Forest Ecology and Management*, 154:155-163.

Wittmann, C.; Aschan, G.; Pfanz, H. Leaf and twig photosynthesis of young beech (*Fagus sylvatica*) and aspen (*Populus tremula*) trees grown under different light regime. *Basic and Applied Ecology*, 2:145-154.

Woodward, F.I.; Lomas, M.R.; Kelly, C.K., 2004. Global climate and the distribution of plant biomes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 359:1465–1476.

Yirdaw, E.; Luukkanen, O., 2004. Photosynthetically active radiation transmittance of forest plantation canopies in the Ethiopian highlands. *Forest Ecology and Management*, 188:17-24.

CAPÍTULO 6

TEORES DE NUTRIENTES NO SOLO E EM FOLHAS DE PLANTAS CULTIVADAS E NATIVAS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Resumo - Sistemas agroflorestais (SAFs) são alternativas aos tradicionais de cultivo da terra, porém, ainda há carência de estudos que comprovem que os SAFs mantêm ou melhoram o teor de nutrientes nas plantas e no solo. Objetivou-se avaliar os teores de macro e micronutrientes de um Luvissole sob sistemas agroflorestal (agrossilvipastoril - AGP), tradicional (TR) e vegetação secundária (MS) em áreas de Caatinga na região semiárida brasileira, bem como em folhas de pau-branco (*Cordia oncocalyx*) e de milho (*Zea mays*). Coletas de solo foram realizadas nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, aleatoriamente na MS e no TR, enquanto que no AGP as amostras foram retiradas a distâncias de 0,20 m (AGP_{sob}) e 4,0 m (AGP_{fora}) do caule do pau-branco. Folhas de pau-branco foram coletadas mensalmente no AGP e na MS, de março a setembro, para análise de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn e Mn. Para verificar o efeito das árvores sobre o conteúdo de nutrientes do milho, este foi plantado a quatro distâncias (um, dois, três e quatro metros) do pau-branco no AGP e plantas cultivadas em sistema tradicional foram consideradas como testemunha. As folhas de milho foram coletadas aos 60 dias após o semeio. O solo no AGP_{sob} apresentou os maiores teores de Nt, Ca²⁺, K⁺, P disponível, Fe, Zn e Mn, indicando um efeito indireto das árvores sobre a manutenção da fertilidade abaixo da copa, ao manter as propriedades físicas do solo, ou um efeito direto sobre o aumento dos nutrientes através da decomposição das folhas. As folhas de pau-branco no AGP apresentaram predominantemente maiores teores mensais de N, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn e Mn, o que pode estar ligado à densidade de árvores por sistema. Os maiores teores de nutrientes sob a copa do pau-branco não se refletiram em melhoria nutricional no milho plantado sob a copa (a um e dois metros do caule), possivelmente em decorrência da competição por luz.

Palavras-chave: Sistema agrossilvipastoril. Mata secundária. Cultivo tradicional. *Cordia oncocalyx*. Milho. Nutrição mineral.

LEVELS OF NUTRIENTS IN SOIL AND LEAVES ON NATIVE AND CULTIVATED PLANTS IN BRAZILIAN SEMIARID

Abstract - Resumo - Agroforestry systems (AFS) are alternatives to traditional cultivation of the land, however, there is still a lack of studies showing that the SAFs maintain or improve the nutrient content in plants and soil. This study aimed to assess the level of macro and micronutrients in Luvisol under agroforestry systems (agrosilvopastoral - AGP), traditional farming (TR) and secondary forest (MS) in areas of Caatinga in Brazilian semiarid region, as well as leaves of pau-branco (*Cordia oncocalyx*) and corn (*Zea mays*). Soil samples were taken at 0-10, 10-20 and 20-40 cm, randomly in MS and TR, while the AGP samples were taken at distances of 0.20 m (AGP_{sob}) and 4.0 m (AGP_{fora}) from pau-branco stem. Pau-branco leaves were collected monthly in AGP and MS, from March to September, for analysis of N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn and Mn. To verify the effect of trees on the nutrient content, maize was planted to four distances (one, two, three and four meters) from pau-branco in AGP and plants growing in traditional system were considered as witnesses. Corn leaves were collected at 60 days after sowing. The soil in AGP_{sob} showed the highest levels of Nt, Ca²⁺, K⁺, P, Fe, Zn and Mn, indicating an indirect effect of trees on the maintenance of fertility below the canopy, while maintaining the physical properties of the soil, or an effect straight on rising nutrients through decomposition of leaves. The leaves of the pau-branco in AGP showed mostly higher levels monthly of Ca, Mg, Fe, Cu, Zn and Mn, which can be connected to the density of trees per system. The highest levels of nutrients under the canopy of white dick is not reflected in improved nutrition in corn planted under the canopy (the one and two meters from the stem), possibly due to competition for light.

Keyword: Agrosilvopastoral system. Secondary forest. Traditional farming. *Cordia oncocalyx*. Corn. Mineral nutrition.

1 INTRODUÇÃO

A forma de uso e ocupação do solo tem efeito direto sobre a conservação ou perda de nutrientes do sistema. Assim, manejos que alterem negativamente as propriedades químicas do solo acompanham reduções no desenvolvimento e teor de nutrientes dos vegetais. Sistemas de cultivo que substituam completamente a diversidade vegetal por monoculturas alteram negativamente as características físicas e químicas do solo, como os tradicionais ou convencionais onde a prática de corte-e-queima da vegetação é comum.

Os sistemas agroflorestais (SAFs) têm despontado como meio alternativo a tais práticas agrícolas, por permitir a manutenção de espécies nativas ou exóticas arbóreas/arbustivas nas áreas cultivadas, estando baseados na premissa de que sistemas de uso da terra estrutural e funcionalmente mais complexos do que monoculturas resultam em maior eficiência na captura e utilização dos recursos ambientais (nutrientes, luz e água) (Nair *et al.*, 2008). Estudos mostram que os SAFs podem reduzir em até 28% a lixiviação de nitrogênio, aumentar a imobilização do carbono dentro das árvores (Palma *et al.*, 2007), melhorar o pH, aumentar a capacidade de troca catiônica (CTC), os teores de bases trocáveis e de carbono orgânico (Sharma, K. *et al.*, 2009) ou ainda elevar os níveis de N, P e K dos solos (Grewal *et al.*, 1994).

Apesar disso, estudos sobre fertilidade do solo comparando os SAFs com outros tipos de uso da terra não são unânimes em apontá-los como grandes promovedores da manutenção e/ou aumento da fertilidade do solo. Rousseou *et al.* (2012) registraram semelhanças entre os teores de carbono orgânico do solo (COS) em florestas e SAFs com cultivo de cacau, enquanto que Fonte *et al.* (2010) e Souza *et al.* (2012) observaram menores teores de COS em SAFs do que em floresta, o que foi associado às elevadas perdas de carbono por erosão. Neupane e Thapa (2001) não observaram diferenças nos teores de COS entre sistemas de cultivo convencional e SAFs com culturas de subsistência no Nepal. SAFs na Região Atlântica da Costa Rica apresentaram menor teor de bases trocáveis do que em pastagens, enquanto N total e COS não diferiram (Tornquist *et al.*, 1999). Maia *et al.* (2006) concluíram que o revolvimento do solo em sistema agrossilvipastoril (um tipo

de SAF que alia cultivo e pecuária, além da manutenção das árvores) em região semiárida provocou redução no teor de COS; adicionalmente, os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram, em algumas camadas, maiores em área de cultivo tradicional e na mata utilizada como referência.

Os componentes dos SAFs incluem as árvores, as culturas e os animais. O efeito dos SAFs sobre o desenvolvimento dos componentes arbóreos ou as plantas cultivadas são reportados na literatura (Ong *et al.*, 2000; Lott *et al.*, 2003; Lose *et al.*, 2003; Muthuri *et al.*, 2009). Existem evidências de que os SAFs podem exercer efeitos benéficos sobre as culturas em comparação com monoculturas (Lehmann *et al.*, 1998; Makumba *et al.*, 2006) mas prejudicar as árvores devido à competição com as plantas cultivadas comparado às árvores desenvolvidas isoladamente (Lott *et al.*, 2000). Assim, os SAFs seriam mais adequados para o cultivo do que sistema tradicional, mas inadequado às espécies arbóreas em comparação com florestas. Contudo, qual seria a influência dos SAFs sobre o teor de nutrientes do solo e que situação de manejo seria mais apropriada às espécies arbóreas e cultivadas? Não foram encontrados estudos que possam responder a esse problema.

Visando verificar as hipóteses de que o AGP apresenta teores de nutrientes no solo intermediários à MS e TR, com reflexos na condição nutricional das plantas nativas e cultivadas. Tem-se como previsões que 1) o teor de nutrientes do solo decresce na sequência: MS>AGP sob a copa das árvores>AGP fora da copa>TR, 2) as plantas de pau-branco possuem maior teor de nutrientes em MS do que em AGP e 3) que os nutrientes em folhas de milho diminuem na sequência: AGP sob a copa>AGP fora da copa>cultivo tradicional. Esse estudo objetivou avaliar os teores de macro e micronutrientes em Luvissole sob sistemas agroflorestal (agrossilvipastoril - AGP) e tradicional (TR) e vegetação secundária (MS) em áreas de Caatinga na região semiárida brasileira, bem como em folhas de pau-branco (*Cordia oncocalyx*) e de milho (*Zea mays*).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Áreas de estudo

As áreas experimentais estão localizadas na Fazenda Crioula, Embrapa Caprinos e Ovinos, Sobral, Ceará, Brasil. O local está situado em região semiárida, com altitude de 70 m acima do nível do mar e declividade predominante entre 3 e 20%. A temperatura e a precipitação médias anuais são de 27 °C e 822 mm, respectivamente, com chuvas concentradas principalmente nos meses de fevereiro a maio (IPECE, 2005). Os solos da área são Luvisolos Crômico Órtico típico e Hipocrômico Órtico típico (Aguiar *et al.*, 2006). A vegetação predominante é a Floresta de Caatinga Média: vegetação arbórea decídua, espinhosa, com árvores perenifólias espalhadas (Andrade-Lima, 1981), porém, em Sobral e outras regiões do Ceará, é possível a existência de uma nova unidade independente, dada a dominância de *Cordia oncocalyx* (pau-branco) (Prado, 2003).

Desde 1997, um experimento de longa duração tem sido conduzido com o objetivo de avaliar alternativas agroflorestais aos sistemas agrícolas tradicionais e convencionais da região. Entre os sistemas avaliados no experimento desenvolvido pela Embrapa Caprinos e Ovinos estão: sistemas de cultivo tradicional, agrossilvipastoril e silvipastoril, além de áreas de reserva nativa utilizadas como testemunhas. Dentre estas situações, as seguintes foram selecionadas para este estudo: *Sistema agrossilvipastoril (AGP)*: compreende uma área de 1,6 ha onde foi adotado o cultivo em aléias, com faixas de 3,0 m de largura, cultivando-se milho (*Zea mays* L.) e/ou sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) intercalado por fileiras de leucena [*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit], implantadas com espaçamento de 0,5 m entre plantas. Esse sistema consiste de, aproximadamente, 200 árvores por hectare, correspondendo a 22% de cobertura do solo. Não há aplicação de fertilizantes ou irrigação e todo o manejo é manual. O material orgânico proveniente de folhas e galhos que foram cortados no início do experimento foi incorporado ao solo. Além deste, a entrada de matéria orgânica e minerais se dá continuamente pela decomposição de folhas e galhos que caem, pela biomassa proveniente das podas de leucena e árvores nativas que são feitas no início da estação chuvosa e ainda pelos dejetos dos animais (ovinos e caprinos) que nela pastejam após a

colheita do cultivo. *Sistema tradicional (TR)*: consiste de área com 1,3 ha de monocultivo de milho, preparada tradicionalmente com retirada da vegetação e queima dos resíduos. Não há adição de fertilizantes ou uso de irrigação. *Mata secundária (MS)*: corresponde a uma área com 1,6 ha de Caatinga arbórea preservada, com vegetação secundária de, aproximadamente, 50 anos, podendo ser eventualmente utilizada para alimentação de animais.

2.2 Espécies avaliadas e desenho experimental

A espécie *Cordia oncocalyx* Allemão (pau-branco), Boraginaceae, foi selecionada por ser comum entre as áreas MS e AGP e também por sua elevada frequência em ambas (49,1% na MS e 50% no AGP; Campanha *et al.*, 2008). As árvores de *C. oncocalyx* são caducifólias, atingem até 12 m de altura e emitem folhas e florescem logo no início do período chuvoso (janeiro/fevereiro). A frutificação inicia-se em seguida (março) e os frutos perduram até o início da estação seca (julho/agosto), quando as plantas perdem as folhas. As árvores no AGP têm tronco único, com diâmetro à altura do peito (DAP) médio de 30 cm; na MS as árvores são perfilhadas, com fustes individuais apresentando DAP entre cinco e 11 cm e cujo somatório dos fustes varia entre 25 e 28 cm por árvore. A abundância de *C. oncocalyx* é de 670 e 80 indivíduos por hectare na MS e no AGP, respectivamente (Aguiar *et al.*, em preparo). Para as análises de nutrientes foliares foram colhidas mensalmente folhas de sol, totalmente expandidas e maduras, sem marcas aparentes de predação ou parasitismo (Boeger *et al.*, 2005), em cinco árvores, sem flores ou frutos, selecionadas pela similaridade no DAP e na altura (aproximadamente 8,0 m no AGP e 9,0 m na MS).

O milho (*Zea mays* L. var. catingueiro) foi a espécie avaliada em condições de monocultivo (TR) e em sistema agrossilvipastoril (AGP). Para averiguar o efeito das árvores sobre o cultivo foram delimitadas cinco parcelas no AGP de 8 m x 8 m, tendo um exemplar do pau-branco ao centro e quatro linhas de milho, distando 1 m entre si, para cada lado do pau-branco, no sentido Norte-Sul, o que totalizou 64 plantas na parcela e 16 plantas por tratamento. O milho foi semeado em fevereiro de 2011 e colhido em maio.

O milho foi semeado a quatro distâncias do caule do pau-branco: 1,0 m (Mil₁), 2,0 m (Mil₂), 3,0 m (Mil₃) e 4,0 m (Mil₄). Considerando a projeção da copa de *C. oncocalyx* ao meio-dia, as plantas de milho localizavam-se sob a copa nas duas primeiras distâncias (Mil₁ e Mil₂), enquanto que na terceira distância (Mil₃) estavam na borda da projeção da copa e na quarta (Mil₄) estavam completamente expostas ao sol (fora da copa).

Para a análise de nutrientes foliares do milho, a fim de se obter material suficiente, foram utilizadas todas as folhas completamente expandidas, das quais a bainha foi retirada. No AGP, uma linha de plantas que continha os quatro tratamentos foi coletada por parcela, no sentido Leste-Oeste. Para coleta no TR foi selecionada aleatoriamente uma linha, no sentido Leste-Oeste, e a cada cinco plantas uma era coletada, até o total de cinco espécimes. Somente o material colhido aos 60 dias após o semeio (DAS) estava em condições adequadas às análises, pois o que foi colhido aos 30 DAS foi insuficiente e aos 90 DAS as folhas já estavam em estágio senil.

2.3 Análises químicas do solo

Para as avaliações químicas de solo, coletas foram realizadas nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, aleatoriamente na MS e no TR, enquanto que no AGP as amostras foram retiradas a distâncias de 0,20 m (AGP_{sob}) e 4,0 m (AGP_{fora}) do caule do pau-branco. Todas as coletas foram realizadas no mês de fevereiro, início do período chuvoso, antes do milho ser cultivado nos sistemas agrossilvipastoril e tradicional. No total, 48 amostras de solo foram retiradas, correspondendo a quatro por profundidade, 12 por tratamento.

As amostras foram secas ao ar, peneiradas (malha de 2,0 mm) e armazenadas. Determinaram-se os teores de carbono orgânico do solo (COS), nitrogênio total (Nt), bases trocáveis (Na⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺), P e K disponíveis, pH em água (1:2,5) e micronutrientes (Fe, Zn, Cu e Mn). As análises foram realizadas no Laboratório de Manejo de Solos da Universidade Federal do Ceará (UFC), conforme Embrapa (1997), com exceção do COS, cujo método utilizado foi o descrito por Mendonça e Matos (2005), o que inclui a oxidação com solução de dicromato de potássio e titulação com sulfato ferroso amoniacal, e do N total, determinado de

acordo com Bremner (1996), por digestão a 350 °C em mistura catalisadora de H₂SO₄, K₂SO₄ e CuSO₄, com posterior destilação e titulação. Para P e K disponíveis, Na⁺ e K⁺ trocáveis utilizou-se Mehlich 1 como extrator e para Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis acetato de amônio a pH 7,0 e titulação com EDTA. Na⁺ e K disponível foram determinados por fotometria de chama e o P disponível por colorimetria. Para os micronutrientes utilizou-se Melich como extrator, na proporção de 1:10 (solo:extrator), e determinação dos teores por espectrofotometria de absorção atômica.

2.4 Análises de nutrientes foliares

As amostras de folhas de pau-branco e de milho foram secas em estufa a 65 °C, até peso constante, moídas, peneiradas (malha de 1,0 mm) e armazenadas para análises de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu e Mn). O procedimento utilizado na determinação do nitrogênio foliar foi o Semi-Micro Kjeldahl (Bremner, 1996). Para os demais nutrientes procedeu-se à digestão úmida utilizando mistura de ácidos nítrico e perclórico, na proporção de 3:1, segundo método proposto por Embrapa (2009). O P foi determinado por colorimetria, K por fotometria de chama, Ca, Mg e micronutrientes por espectrofotometria de absorção atômica. As análises foram realizadas no Laboratório de Manejo de Solos da UFC. Para comparações dos teores dos nutrientes do milho utilizou-se Embrapa (2009) como referência.

2.5 Análises estatísticas

A análise de variância, seguida pelo teste de Tukey, a 5% de significância, foi utilizada para verificar a existência de diferenças estatísticas entre as médias de cada variável química de solo dos quatro tratamentos (MS, TR, AGP_{sob} e AGP_{fora}), bem como entre as médias dos nutrientes foliares do milho nos quatro tratamentos do AGP (Mil₁, Mil₂, Mil₃ e mil₄) e do TR. As variações nos teores de nutrientes foliares do pau-branco ao longo dos meses, comparando-se AGP e MS, são apresentadas em gráficos construídos com o software Microcal OriginTM (1997) para os quais utilizou-se estatística descritiva (média±erro padrão).

3 RESULTADOS

3.1 Análises químicas do solo

O uso e ocupação do solo das três áreas avaliadas não promoveu diferenças significativas nos valores de pH em água, COS ou Na^+ ($p > 0,05$), sobretudo na profundidade de 0-10 cm (Tabela 6.1). O solo sob a copa das árvores de pau-branco (AGP_{sob}) apresentou os maiores teores de Nt, Ca^{2+} , P disponível, Fe, Zn e Mn. De forma oposta, esses nutrientes tiveram concentrações muito baixas no TR, sobretudo na camada de 0-10 cm, onde foram registradas as maiores discrepâncias nos teores dos nutrientes entre os sistemas. O solo coletado fora da copa do pau-branco (AGP_{fora}) e na mata secundária (MS) apresentaram teores semelhantes de Nt, K^+ , Fe, Zn e Mn nas duas primeiras profundidades investigadas.

No AGP, sob e fora da copa, os valores de Ca^+ atingiram quase duas vezes o registrado na MS e mais do que isso em relação ao TR, nos primeiros 10 cm de profundidade, enquanto o P disponível apresenta teor ca. de 26 vezes maior no AGP_{sob} que na MS, 13 vezes mais que no TR e duas vezes mais que no AGP_{fora} , para essa mesma profundidade. Nas demais profundidades o teor de P disponível no AGP_{sob} também foi consideravelmente maior que nos demais tratamentos. Desconsiderando os nutrientes que foram estatisticamente semelhantes para todas as áreas de amostragem de solo, AGP_{fora} e AGP_{sob} tiveram teores similares apenas de Ca^{2+} , na profundidade 0-10 cm.

O TR apresentou elevados teores de Cu e K^+ nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm (Tabela 6.1). A MS, contudo, não exibiu maiores médias para nenhum dos elementos avaliados, sendo que, de forma contrária, P disponível e Fe foram registrados em menores quantidades nesse sistema.

Tabela 6.1. Propriedades químicas de um Luvissole sob diferentes manejos, Fazenda Crioula, Sobral-CE

Tratamentos	pH	Nt	COS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	P	Fe	Cu	Zn	Mn
		----- g kg ⁻¹ -----		-cmol _c dm ⁻³ -			-----mg kg ⁻¹ -----					
----- 0-10 cm de profundidade -----												
MS	6,41 ^a	1,26 ^b	35,47 ^a	4,20 ^b	2,03 ^a	25,50 ^a	110,50 ^b	3,84 ^c	9,82 ^c	0,56 ^b	3,24 ^b	101,45 ^b
AGP _{sob}	6,76 ^a	2,41 ^a	33,42 ^a	8,17 ^a	2,05 ^a	28,00 ^a	269,50 ^a	102,04 ^a	45,63 ^a	0,69 ^b	6,86 ^a	178,53 ^a
AGP _{fora}	6,81 ^a	1,22 ^b	24,25 ^a	6,77 ^a	2,55 ^a	21,00 ^a	186,00 ^b	33,23 ^b	14,28 ^c	0,33 ^c	2,27 ^b	80,96 ^b
TR	6,42 ^a	0,77 ^c	26,07 ^a	3,82 ^b	3,07 ^a	21,00 ^a	236,00 ^a	7,35 ^c	26,08 ^b	1,12 ^a	2,52 ^b	81,63 ^b
----- 10-20 cm de profundidade -----												
MS	6,31 ^a	0,67 ^a	21,17 ^a	3,42 ^c	1,95 ^b	26,50 ^a	90,50 ^b	1,46 ^b	10,69 ^b	1,23 ^b	1,48 ^b	65,43 ^a
AGP _{sob}	6,39 ^a	0,59 ^a	27,38 ^a	5,57 ^b	2,65 ^{ab}	29,50 ^a	121,00 ^{ab}	41,21 ^a	20,57 ^a	0,36 ^c	2,30 ^a	66,34 ^a
AGP _{fora}	6,36 ^a	0,42 ^a	20,77 ^a	8,70 ^a	3,85 ^a	33,50 ^a	84,50 ^b	6,20 ^b	27,01 ^a	0,54 ^c	1,37 ^b	57,75 ^a
TR	6,20 ^a	0,66 ^a	19,80 ^a	2,92 ^c	3,20 ^a	17,00 ^b	166,50 ^a	3,23 ^b	20,44 ^a	2,08 ^a	1,58 ^a	64,59 ^a
----- 20-40 cm de profundidade -----												
MS	6,36 ^a	0,66 ^a	16,35 ^a	4,00 ^b	3,55 ^a	35,50 ^a	83,50 ^{ab}	1,46 ^b	15,45 ^b	1,83 ^b	1,45 ^a	47,59 ^a
AGP _{sob}	5,98 ^a	0,52 ^a	12,61 ^a	6,75 ^a	3,55 ^a	44,50 ^a	72,00 ^b	24,35 ^a	37,68 ^a	0,72 ^c	1,51 ^a	59,00 ^a
AGP _{fora}	6,33 ^a	0,35 ^b	21,69 ^a	6,17 ^a	3,92 ^a	32,50 ^a	57,50 ^b	2,33 ^b	19,43 ^b	0,81 ^c	1,70 ^a	49,44 ^a
TR	5,87 ^a	0,31 ^b	19,56 ^a	3,57 ^b	2,96 ^a	19,50 ^b	116,50 ^a	1,90 ^b	41,02 ^a	3,71 ^a	1,58 ^a	56,64 ^a

MS – mata secundária; AGP_{sob} – sistema agrossilvipastoril, coletas sob a copa do pau-branco; AGP_{fora} – sistema agrossilvipastoril, coletas fora da copa do pau-branco; TR – sistema de cultivo tradicional. Médias seguidas de letra igual não diferem entre tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, n = 4.

3.2 Nutrientes foliares do pau-branco e do milho

Os teores de nutrientes foliares do pau-branco não apresentaram um padrão quanto à distribuição entre os meses e entre os ambientes (Figura 6.1). O N apresentou tendência a ser maior no AGP, todavia, houve semelhança entre os sistemas em abril e julho. Os teores de P e K foram maiores na MS que no AGP praticamente em todos os meses. Os valores de Ca, Mg, Fe e Mn foram predominantemente maiores no AGP. As médias de Cu foram maiores na MS de março a maio e no AGP de junho a setembro. Os teores de Zn entre os dois ambientes foram semelhantes em março, abril e junho, e maiores no AGP em maio e de julho a setembro.

As concentrações foliares de N, P, Mg, Cu e Zn apresentaram tendência à redução entre o início do período chuvoso (março) e o início da estação seca (agosto e setembro), Ca, Fe e Mn apresentaram tendência inversa e apenas K apresentou teores relativamente constantes ao longo dos meses, sem tendência a aumentos ou reduções entre os períodos (Figura 6.1).

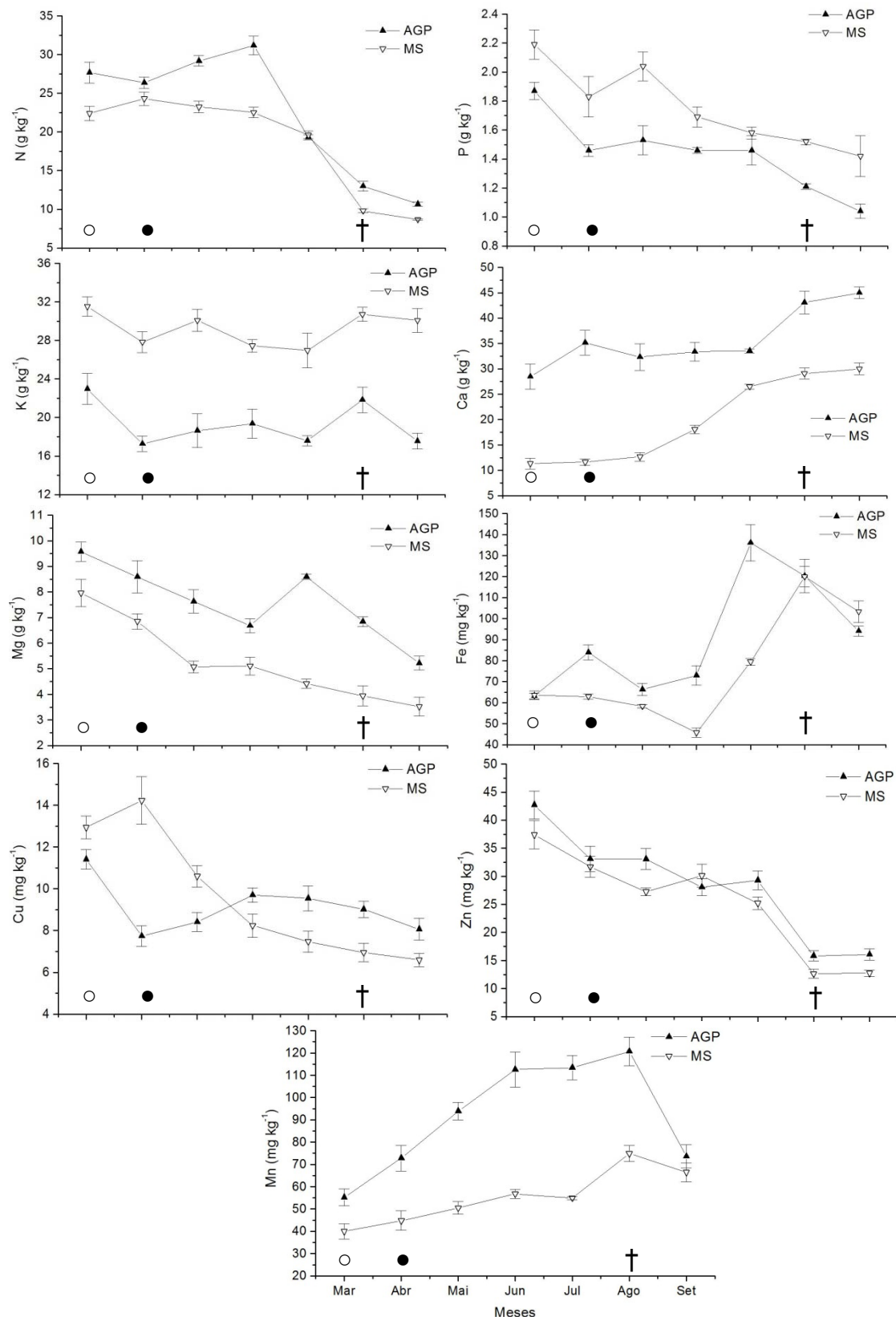


Figura 6.1. Teores de macro e micronutrientes em folhas apicais de pau-branco, de março a setembro de 2011, em sistema agrossilvipastoril (AGP) e mata secundária (MS), Fazenda Crioula, Sobral-CE (n = 5). Os símbolos na porção inferior dos gráficos indicam estádios de desenvolvimento do pau-branco: ○ – folhas jovens/floração, ● – frutificação/folhas maduras e † - caducifolia.

A Tabela 6.2 apresenta os resultados dos teores de macro e micronutrientes foliares do milho cultivado no AGP e no TR. Os teores de N não diferiram ($p > 0,05$) em função das distâncias do caule do pau-branco no AGP, porém foram maiores neste sistema do que no TR. Apesar disso, as médias de N para o milho estão todas aquém daquelas consideradas como referência.

Os teores de P foram maiores ($p < 0,05$) a três e a quatro metros de distância das árvores de pau-branco (Mil₃ e Mil₄), sendo compatível com o esperado para a cultura (2-4 g kg⁻¹) (Tabela 6.2). O TR apresentou menor teor médio de K, entretanto neste e nos demais tratamentos o teor médio do nutriente estava de acordo com o de referência. Os teores de Ca das plantas cultivadas no AGP e no TR diferiram entre si, mas foram inferiores àqueles considerados como referência. Mil₁, Mil₂, Mil₃ e Mil₄ apresentaram menores teores de Mg do que o TR, porém, todos estão compreendidos entre os limites mínimo e máximo registrados como referência.

Os teores de Fe mostraram-se menores apenas em Mil₂, entretanto, todos os valores observados são pelo menos duas vezes maiores que aqueles apresentados como referência. No TR foi registrada a menor média para o Cu, enquanto os teores de Zn foram menores em Mil₁ e o de Mn nas plantas do AGP, contudo, para estes três nutrientes, os valores estão de acordo com as referências.

Tabela 6.2. Teores de macro e micronutrientes em folhas de milho cultivado em sistema agrossilvipastoril, a 1 m (Mil₁), 2 m (Mil₂), 3 m (Mil₃) e 4 m (Mil₄) de distância do caule do pau-branco (*Cordia oncocalyx*), e em sistema de cultivo tradicional (TR)

Trat.	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn
	----- g kg ⁻¹ -----					----- mg kg ⁻¹ -----			
Mil ₁	10,28 ^a	0,76 ^b	28,48 ^a	1,82 ^a	2,95 ^b	695,99 ^a	10,37 ^a	67,46 ^b	44,49 ^b
Mil ₂	11,59 ^a	1,42 ^b	27,52 ^a	1,09 ^b	3,18 ^b	538,44 ^b	8,56 ^b	73,07 ^{ab}	40,83 ^b
Mil ₃	12,39 ^a	2,83 ^a	29,28 ^a	1,33 ^{ab}	3,41 ^b	600,44 ^a	9,59 ^{ab}	97,04 ^a	36,16 ^c
Mil ₄	11,52 ^a	2,16 ^a	26,72 ^a	1,30 ^{ab}	3,07 ^b	630,22 ^a	9,22 ^{ab}	73,68 ^{ab}	35,60 ^c
TR	6,50 ^b	1,39 ^b	21,28 ^b	1,06 ^b	5,74 ^a	620,40 ^a	6,53 ^c	92,77 ^a	54,72 ^a
Referência	27-35	2-4	17-35	2,5-8	1,5-5	30-250	6-20	15-100	20-200

Referência – teores considerados normais para cada nutriente em plantas de milho, de acordo com Embrapa (2009). Médias seguidas de letras iguais não diferem entre tratamentos pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade ($n = 5$).

4 DISCUSSÃO

4.1 Nutrientes do solo

Os teores de Nt, Ca^{2+} , P disponível, Fe, Zn e Mn do solo, na camada de 0-10 cm, foram maiores no AGP sob a copa do pau-branco (a 0,20 m do caule), possivelmente devido à influência das árvores. As árvores podem interceptar, pela copa e tronco, mais de 10% da água da chuva dependendo do tipo de dossel e do diâmetro do caule (Jackson, 2000). Assim, o impacto físico das gotas de chuva é atenuado, mantendo-se a estabilidade dos agregados, o que diminui a quantidade de material carregado e, com isso, reduz-se as perdas de nutrientes do solo abaixo da copa das árvores, sobretudo minerais de baixa mobilidade no solo, como o P, cujo principal processo de perda é a lixiviação (Gebrim *et al.*, 2010). Além disso, o aumento nos teores de nutrientes pode-se dar via decomposição das folhas depositadas sob a copa ou recreção, que representa o carregamento de nutrientes das folhas e do tronco pela água da chuva, principalmente o K^+ (Perez-Marin; Menezes, 2008; Berthelot *et al.*, 2000). Contrariamente, em locais com reduzida cobertura do solo, a tendência é que as perdas de solo, água e nutrientes por erosão ocorram (Aguiar *et al.*, 2010), o que pode explicar os menores valores registrados na MS e no AGP_{fora} de K^+ , elemento com alta mobilidade no solo, além de Fe, Zn e Mn.

As divergências registradas entre os ambientes quanto ao teor de nutrientes também devem ser analisadas considerando-se que áreas com diferentes manejos sofrem perdas diferenciadamente (Grewal *et al.*, 1994; Schroth *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2011). Aguiar *et al.* (2006) registraram que as perdas de água, solo e de alguns nutrientes por erosão foram distintas entre AGP, MS e TR, no mesmo experimento deste estudo. Adicionalmente, alterações no uso da terra e cobertura vegetal afetam os padrões de captação de água pelas plantas (Asbjornsen *et al.*, 2007), como também os teores de nutrientes. O pau-branco em SAF capta água em camadas mais profundas, enquanto na MS a absorção de água preferencialmente se dá mais superficialmente (até 30 cm de profundidade) (Capítulo 4). De acordo com estes dados, a depleção de nutrientes seria maior nas respectivas camadas de absorção.

Estudos desenvolvidos por Sharma, G. *et al.* (2009), revelam variações sazonais nos teores de nutrientes do solo coincidentes com as épocas de floração e frutificação das plantas cultivadas, o que enfatiza o potencial das plantas em reduzir os nutrientes do solo em camadas e épocas específicas. De fato, é possível que isso seja verdadeiro com relação a alguns nutrientes. Como exemplo, o K^+ diminuiu 73% no AGP_{sob}, 69% no AGP_{fora} e 24% na MS, entre as camadas de 0-10 e 20-40 cm, indicando forte depleção do elemento em camadas mais profundas no AGP, que coincidem com a zona de absorção de água do pau-branco nesse sistema. De forma semelhante, o P disponível, elemento pouco móvel no solo, cuja absorção depende essencialmente da interceptação radicular, também apresentou elevadas reduções entre camadas (76% no AGP_{sob}, 93% no AGP_{fora} e 62% na MS, da camada de 0-10 para a de 20-40 cm). Se não houvesse teores elevados no solo do AGP, poder-se-ia conjecturar a ocorrência de competição por esse elemento entre as plantas desse sistema, sobretudo fora da copa das árvores.

De forma geral, maiores teores de N, Mg, Fe, Cu e Zn foram registrados nas folhas (milho e pau-branco) do que no solo nos três sistemas (Tabelas 6.1 e 6.2), indicando elevada absorção desses elementos, além de indicar a dependência dessas plantas para reposição dos mesmos ao solo. Como por ocasião da colheita dos produtos cultivados certa quantidade de material vegetal não fica no sistema, esses nutrientes não voltam ao solo e a presença de árvores torna-se então fundamental para ciclagem de nutrientes e manutenção da fertilidade do solo (Zeng *et al.*, 2010), sobretudo em sistemas de uso da terra que não adicionam insumos externos, como fertilizantes. Isso explica porque alguns elementos químicos avaliados foram encontrados em menores quantidades no TR do que no AGP.

4.2 Nutrientes em folhas de pau-branco

O manejo das áreas promoveu diferenças na concentração de nutrientes foliares no pau-branco entre AGP e MS (Figura 6.1). As folhas apresentaram concentrações predominantemente maiores de P e K na MS e de N, Ca, Mg, Fe e Mn no AGP. Observando-se as variações nos teores de nutrientes do pau-branco, desde as folhas jovens até a caducifolia (Figura 6.1), é possível separá-los em três categorias: 1 – nutrientes cuja concentração diminui no sentido do período de

senescência (meses secos), o que inclui N, P, Cu, Mg e Zn; 2 – nutrientes cuja concentração aumenta no sentido do período de senescência, o que engloba Ca, Fe e Mn; e 3 – nutriente cuja concentração é pouco variável ao longo do desenvolvimento da planta, adequando-se à categoria apenas o K.

Elementos altamente móveis na planta como N, P e Mg estão em grandes concentrações nas folhas jovens e com o envelhecimento são gradualmente redistribuídos (Kerbaudy, 2004; Larcher, 2006). Ca, Fe e Mn são elementos com pouca mobilidade no floema, sendo, assim, pouco redistribuídos, o que favorece o acúmulo vacuolar ao final da via de transporte xilemática, e eleva o seu teor em folhas mais velhas (Larcher, 2006). O K é o cátion mais abundante no citoplasma e sua concentração é ainda maior nas células-guarda dos estômatos, onde desempenha importante função no controle do aparato estomático e do potencial osmótico da célula (Kerbaudy, 2004). Este elemento foi encontrado em maior quantidade nas folhas do pau-branco na MS do que no AGP. Como a MS apresentou menor teor de K no solo, é possível que as plantas de pau-branco nesse sistema tenham desenvolvido ajustes para manter a fotossíntese, como aumento no requerimento de K, o qual em escassez aumenta a resistência estomática (Bednarz *et al.*, 1998). Assim, com maior concentração de K foliar, as plantas podem assegurar a fixação de carbono, o que foi de fato observado no período chuvoso (Capítulo 3).

Os valores médios de N foliar do pau-branco, considerando todo o período de estudo, foram de 18,6 g kg⁻¹ na MS e 22,5 g kg⁻¹ no AGP, valores estes intermediários entre *Acacia crassicarpa* e *Gliricidia sepium*, ambas árvores leguminosas (Kimaro *et al.*, 2008). As médias sobem para 22 g kg⁻¹ (MS) e 27 g kg⁻¹ (AGP) se for considerado apenas o período chuvoso. Dessa forma, estudos sobre a existência de associações benéficas entre microrganismos que cooperem para a fixação biológica de nitrogênio e raízes de pau-branco poderiam subsidiar informações a respeito de como plantas nativas, não leguminosas, que vegetam em solo com baixo conteúdo de nitrogênio podem apresentar teores semelhantes a leguminosas ou mesmo plantas cultivadas, como eucalipto e uva (Silva *et al.*, 2008; Pessanha *et al.*, 2011).

4.3 Nutrientes em folhas de milho

Os nutrientes N, P, K e Cu foram observados em maiores concentrações nas folhas do milho no AGP enquanto as de Mg e Mn foram maiores no TR (Tabela 6.2), revelando que o manejo agroflorestal pode aumentar o teor de nutrientes nas folhas das plantas cultivadas, embora o efeito não seja o mesmo para todos os elementos. Os teores elevados de Mg, Zn, e Mn nas folhas do milho no TR acompanham os teores do solo desse sistema (Tabelas 6.1 e 6.2), e indicam que as reduzidas concentrações em alguns nutrientes (como N e Ca, que estavam em concentrações inferiores à referência), podem ter sido decorrentes de deficiências no solo.

A distância do caule do pau-branco não teve efeito sobre os teores de N, K e Mg nas plantas cultivadas no AGP, enquanto houve diferença nos teores de P, Ca, Fe, Cu, Zn e Mn entre plantas sob e fora da copa do pau-branco. Entretanto, os valores de P aumentam, os de Mn diminuem e os demais não apresentam uma sequência nítida à medida que as plantas se distanciam do caule. Essas tendências, porém, não seguem as observadas para os mesmos elementos nas análises de solo, com exceção do Mn, que diminui da região sob para fora da copa.

Dos nove elementos avaliados, apenas N, P e Ca foram registradas em concentrações muito baixas nas folhas de milho, tanto no AGP quanto no TR. Os teores de N no limbo foliar do milho foram inferiores à metade daqueles registrados pela Embrapa (2009) como sendo normais para esta espécie (Tabela 6.2), o que pode estar relacionado à variedade que foi utilizada neste experimento. A var. Catingueiro é melhorada geneticamente para desenvolver-se bem em regiões com baixa precipitação pluviométrica, sendo que a maioria dos municípios onde o cultivo da variedade apresentou bom desenvolvimento teve precipitação entre 400 e 600 mm ano⁻¹ (Carvalho *et al.*, 2004). Todavia, no município de Sobral, em 2011, os eventos chuvosos ultrapassaram 800 mm de chuva (Capítulo 5), podendo, com isso, ter afetado o desenvolvimento do milho. Entretanto, apesar dos valores aquém das referências, nota-se o efeito do manejo agroflorestal sobre os teores dos nutrientes nas plantas do AGP em relação às do TR, não havendo efeito da distancia do caule do pau-branco sobre o teor de N. A ausência de árvores no TR, aliada à perda de água e sedimentos (Aguiar *et al.*, 2006), pode explicar a redução do Nt do solo

(Tabela 6.1), que foi refletida na quantidade desse macroelemento nas lâminas foliares do milho.

Os baixos teores de P nas folhas em Mil₁ e Mil₂, diferentemente das plantas do TR, não estão relacionados ao teor do elemento no solo, mas possivelmente ao sombreamento pela copa do pau-branco, que promoveu competição por luz e levou à redução no crescimento e desenvolvimento do milho, culminando em baixa produção de biomassa (Capítulo 2). O P, elemento requerido em menor quantidade entre os macronutrientes, é frequentemente o que mais limita a produção por ser constituinte de compostos fornecedores de energia e intermediários nos ciclos de fixação de carbono (Taiz; Zeiger, 2002), assim, em conformidade com a Lei do Mínimo de Liebig, sua escassez limita o crescimento e o rendimento das plantas, sobretudo associado a reduzidos valores de N.

A sequência decrescente $AGP_{sob} > AGP_{fora} > TR$ registrada para o Ca^{2+} do solo não foi observada quanto ao teor do elemento nas folhas de milho e, apesar de algumas poucas diferenças entre os tratamentos, todas as médias para o Ca estão aquém do padrão. Deficiências de Ca evidenciam-se como distúrbios na divisão celular e impedimento do crescimento radicular, com isso, dada sua absorção fundamentalmente por interceptação radicular em virtude da baixa mobilidade do mineral no solo, sua entrada na planta é limitada quando a extensão das raízes é reduzida (Hawkesford *et al.*, 1995; Taiz; Zeiger, 2002).

5 CONCLUSÕES

Os teores de nutrientes do solo em função do uso da terra decrescem na sequência: $AGP_{sob} > TR > AGP_{fora} = MS$. As folhas de pau-branco no AGP apresentaram predominantemente maiores teores mensais de N, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn e Mn, revelando os benefícios do manejo agroflorestal sobre a qualidade nutricional das plantas arbóreas. A quantidade nutricional de folhas de milho, sob efeito do manejo da área, decresce na sequência $AGP_{fora} > AGP_{sob} > TR$, de forma diferente da observada para o solo, indicando que a quantidade de nutrientes no solo pode não ser refletida pelas plantas cultivadas e que, nesse sentido, é possível que haja outros fatores influenciando o estado nutricional da cultura. Assim, o manejo

agrossilvipastoril promove melhores condições nutricionais tanto no solo quanto nas plantas arbóreas nativas e cultivadas.

REFERÊNCIAS

- Aguiar, M.I.; Maia, S.M.F.; Oliveira, T.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J.A., 2006. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. *Revista Ciência Agronômica*, 37:270-278.
- Aguiar, M.I.; Maia, S.M.F.; Xavier, F.A.S.; Mendonça, E.S.; Araújo Filho, J.A.; Oliveira, T.S., 2010. Sediment, nutrient and water losses by water erosion under agroforestry systems in the semi-arid region in northeastern Brazil. *Agroforestry Systems*, 79:277-289.
- Andrade-Lima, D., 1981. The caatingas dominium. *Revista Brasileira de Botânica*, 4:149-163.
- Asbjornsen, H.; Mora, G.; Helmers, M.J., 2007. Variation in water uptake dynamics among contrasting agricultural and native plant communities in the Midwestern U.S. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121:343-356.
- Bednarz, C.W.; Oosterhuis, D.M.; Evans, R.D., 1998. Leaf photosynthesis and carbon isotope discrimination of cotton in response to potassium deficiency. *Environmental and Experimental Botany*, 39:131-139.
- Berthelot, A.; Ranger, J.; Gelhaye, D., 2000. Nutrient uptake and immobilization in a short-rotation coppice stand of hybrid poplars in north-west France. *Forest Ecology and Management*, 128:167-179.
- Boeger, M.R.; Wisniewski, C.; Reissmann C.B., 2005. Nutrientes foliares de espécies arbóreas de três estádios sucessionais de floresta ombrófila densa no sul do Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, 19:167-181.
- Bremner, J.M., 1996. Nitrogen total, pp. 1085-1121. In: *Methods of soil analysis* (Sparks, D.L., ed.). Madison: American Society of Agronomy.
- Carvalho, H.W.; Santos, M.X.; Silva, A.A.; Cardoso, M.J.; Santos, D.M.; Tabosa, J.N.; Michereff-Filho, M.; Lira, M.A.; Bonfim, M.H.; Souza, E.M.; Sampaio, G.V.; Brito, A.R.; Dourado, V.V.; Tavares, J.A.; Neto, J.G.; Nascimento, M.M.; Tavares-Filho, J.J.; Andrade-Júnior, A.S.; Carvalho, B.C., 2004. *Catingueiro – uma variedade de milho para o semiárido nordestino*. Aracaju: Embrapa. Comunicado Técnico, 29.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, 1997. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, 2009. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica.

Fonte, S.J.; Barrios, E.; Six, J., 2010. Earthworms, soil fertility and aggregate-associated soil organic matter dynamics in the Quesungual agroforestry system. *Geoderma*, 155:320-328.

Gebrim, F.O.; Novais, R.F.; Silva, I.R., Schultais, F.; Vergütz, L.; Procópio, L.C.; Moreira, F.F.; Jesus, G.L., 2010. Mobility of inorganic and organic phosphorus forms under different levels of phosphate and poultry litter fertilization in soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34:1195-1205.

Grewal, S.S.; Juneja, M.L.; Singh, K.; Singh, S., 1994. A comparison of two agroforestry systems for soil, water and nutrient conservation on degraded land. *Soil Technology*, 7:145-153.

Hawkesford, M.; Horst, W.; Kichey, T.; Lambers, H.; Schjoerring, J.; Møller, I.S.; White, P., 1995. Functions of Macronutrients, pp. 135-189. In: *Nutrition Mineral of Higher Plants* (Marschner, H., ed). New York; Academic Press.

Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – IPECE, 2005. *Perfil Básico Municipal, Sobral*. Secretaria do Planejamento e Coordenação, Governo do Estado do Ceará, Fortaleza.

Jackson, N.A., 2000. Measured and modelled rainfall interception loss from an agroforestry system in Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100:323-336.

Kerbaudy, G.B., 2004. *Fisiologia vegetal*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A.

Kimaro, A.A.; Timmer, S. V.R.; Chamshama, A.O.; Mugasha, A.G.; Kimaro, D.A., 2008. Differential response to tree fallows in rotational woodlot systems in semi-arid Tanzania: Post-fallow maize yield, nutrient uptake, and soil nutrients. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 125:73-83.

Larcher, W., 2006. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: RiMa.

Lehmann, J.; Peter, I.; Steglich, C.; Gebauer, G.; Huwe, B.; Zech, W., 1998. Below-ground interactions in dryland agroforestry. *Forest Ecology and Management*, 111:157-169

Lose, S.J.; Hilger, T.H.; Leihner, D.E.; Kroschel, J., 2003. Cassava, maize and tree root development as affected by various agroforestry and cropping systems in Bénin, West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 100:137-151.

Lott, J.E.; Howard, S.B.; Ong, C.K.; Black, C.R., 2000. Long-term productivity of a *Grevillea robusta*-based overstorey agroforestry system in semi-arid Kenya: I. Tree growth. *Forest Ecology and Management*, 139: 175-186.

Lott, J.E.; Khan, A.A.H., Black, C.R.; Ong, C.K., 2003. Water use in a *Grevillea robusta*–maize overstorey agroforestry system in semi-arid Kenya. *Forest Ecology and Management*, 180:45-59.

Maia, S.M.; Xavier, F.A.; Oliveira, T.S.; Mendonça, E.S.; Araújo-Filho, J.A., 2006. Impactos de sistemas agrofloretais e convencional sobre a qualidade do solo no semi-árido cearense. *Revista Árvore*, 30:837-848.

Makumba, W.; Janssen, B.; Oenema, O.; Akinnifesi, F.K.; Mweta, D.; Kwesiga, F., 2006. The long-term effects of a gliricidia–maize intercropping system in Southern Malawi, on gliricidia and maize yields, and soil properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 116:85-92.

Mendonça, E.S.; Matos, E.S., 2005. *Matéria orgânica do solo: métodos de análises*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.

Microcal Software INC., 1997. Data analysis and technical graphics software. Origin Professional version 6.0. Northampton, MA.

Muthuri, C.W.; Ong, C.K.; Craigon, J.; Mati, B.M.; Ngumi, V.W.; Black, C.R., 2009. Gas exchange and water use efficiency of trees and maize in agroforestry systems in semi-arid Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 129:497-507.

Nair, P.K.R.; Gordon, A.M.; Mosquera-Losada, M.R., 2008. Agroforestry, pp. 101-110. In: *Encyclopedia of Ecology*. Elsevier, vol. 1.

Neupane, R.P.; Thapa, G.B., 2001. Impact of agroforestry intervention on soil fertility and farm income under the subsistence farming system of the middle hills, Nepal. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 84:157-167.

Ong, C.K.; Black, C.R.; Wallace, J.S.; Khan, A.A.H.; Lott, J.E.; Jackson, N.A.; Howard, S.B.; Smith, D.M., 2000. Productivity, microclimate and water use in *Grevillea robusta*-based agroforestry systems on hillslopes in semi-arid Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 80:121-141.

Palma, J.H.N.; Graves, A. R.; Bunce, R. G. H.; Burgess, P. J.; Filippi, R.; Keesman, K. J.; Keulen, H.; Liagre, F.; Mayus, M.; Moreno, G.; Reisner, Y.; Herzog, F., 2007. Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 119:320-334.

Perez-Marin, A.M.; Menezes, R.S.C., 2008. Ciclagem de nutrientes via precipitação pluvial total, interna e escoamento pelo tronco em sistema agroflorestral com *Gliricidia sepium*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:2573-2579.

Pessanha, P.G.O.; Viana, A.P.; Carvalho, A.J.C.; Oliveira, J.G., 2011. Nutrientes minerais no limbo foliar de genótipos de videira cultivados no norte fluminense. *Revista Caatinga*, 24:33-39.

- Prado, D.E., 2003. As caatingas da América do Sul, pp. 3-73. In: *Ecologia e conservação da caatinga* (Leal, I.R.; Tabarelli, M.; Silva, J.M.C., eds.). Recife: Ed. Universitária da UFPE.
- Rousseau, G.X.; Deheuvels, O.; Rodriguez Arias, I.; Somarriba, E., 2012. Indicating soil quality in cacao-based agroforestry systems and old-growth forests: The potential of soil macrofauna assemblage. *Ecological Indicators*, 23:535-543.
- Schroth, G.; D'Angelo, S.A.; Geraldles, W.; Teixeira, D.H.; Lieberei, R., 2002. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. *Forest Ecology and Management*, 163:131-150.
- Sharma, G.; Sharma, R.; Sharma, E., 2009. Impact of stand age on soil C, N and P dynamics in a 40-year chronosequence of alder-cardamom agroforestry stands of the Sikkim Himalaya. *Pedobiologia*, 52:401-414.
- Sharma, K.L.; Raju, K.R.; Das, S.K.; Rao, B.R.C.P.; Kulkarni, B.S.; Srinivas, K.; Grace, J.K.; Madhavi, M.; Gajbhiye, P.N., 2009. Soil fertility and quality assessment under tree-, crop-, and pasture-based land-use systems in a rainfed environment. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 40:1436-1461.
- Silva, P.H.M.; Poggiani, F.; Gonçalves, J.L.M.; Stape, J.L., 2008. Volume de madeira e concentração foliar de nutrientes em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* fertilizadas com lodos de esgoto úmido e seco. *Revista Árvore*, 32: 845-854.
- Souza, H.N.; Goede, R.G.M.; Brussaard, I.; Cardoso, I.M.; Duarte, E.M.G.; Fernandes, R.B.A.; Gomes, L.C.; Pulleman, M.M., 2012. Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 146: 179-196.
- Taiz, L.; Zeiger, E., 2002. *Plant Physiology*. Massachusetts: Sinauer Associates.
- Tornquist, C.G.; Hons, F.M.; Feagley, S.E.; Haggard, J., 1999. Agroforestry system effects on soil characteristics of the Sarapiquí region of Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 73: 19-28.
- Wang, Y.; Zhang, B.; Lin, L.; Zepp, H., 2011. Agroforestry system reduces subsurface lateral flow and nitrate loss in Jiangxi Province, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140:441-453.
- Zeng, D-H.; Mao, R.; Chang, S.X.; Li, L-J.; Yang, D., 2010. Carbon mineralization of tree leaf litter and crop residues from poplar-based agroforestry systems in Northeast China: A laboratory study. *Applied Soil Ecology*, 44:133-137.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os SAFs apresentaram-se como alternativas viáveis ao desenvolvimento das plantas nativas e cultivadas, bem como do solo, que apresentou elevados teores de nutrientes, sobretudo sob a copa do pau-branco, revelando a importância de preservação das árvores para manutenção da qualidade química do solo. Algumas evidências da existência de competição entre milho e pau-branco foram observadas, em especial no que concerne à radiação incidente, havendo também a possibilidade de competição por água devido à sobreposição nas zonas de captação de água do milho e do pau-branco observada em campo e pelas alterações nas trocas gasosas e desenvolvimento do milho observadas em casa de vegetação. Alguns parâmetros físicos do ambiente apresentaram valores mais extremos no AGP (ex. temperaturas do ar e do solo mais elevadas, menor umidade relativa do ar) quando comparados à MS, devido à menor densidade de árvores, entretanto, os resultados apontam para o desenvolvimento de adaptações das plantas para sobrevivência em tais condições.

Alguns questionamentos foram feitos ao longo das discussões dos capítulos que compõem essa tese e constituem-se como pontos de partida para um sequenciamento dessa pesquisa ou para novos estudos. Pesquisas em SAFs na região semiárida brasileira ainda são incipientes e, assim como a análise de isótopos estáveis, ainda constituem-se como um vasto campo de pesquisa. Os resultados sobre ecofisiologia do pau-branco apresentados no Capítulo 3 são insuficientes para explicar enfaticamente a razão das plantas manterem-se verdes por mais tempo e carece análise de outras variáveis. Mais repetições também devem ser feitas para a determinação precisa das zonas de captação de água das plantas em SAF comparando-o a outras situações de uso da terra. Entretanto, o que aqui foi exposto é muito importante para subsidiar pesquisas futuras.

Assim, do ponto-de-vista da sustentabilidade e produção de massa seca de árvores e do milho, aponta-se o AGP como um sistema adequado às condições locais, devendo somar-se a isso avaliações dos custos de manutenção do sistema e da capacidade de suporte do SAF para a adequada sobrevivência dos rebanhos.

REFERÊNCIAS GERAIS

- Asbjornsen, H.; Mora, G.; Helmers, M.J., 2007. Variation in water uptake dynamics among contrasting agricultural and native plant communities in the Midwestern U.S. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121:343-356.
- Begon, M.; Townsend, C.R.; Harper, J.L., 2006. *Ecology: from individuals to ecosystems*. Oxford: Blackwell Publishing, 759p.
- Chauhani, S.K.; Sharma, S.C.; Beri, V.; Ritu; Yadav, S.; Gupta, N., 2010. Yield and carbon sequestration potential of wheat (*Triticum aestivum*)-poplar (*Populus deltoides*) based agri-silvicultural system. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 80:129-135.
- Espigares, T.; López-Pintor, A.; Benayas, J.M.R., 2004. Is the interaction between *Retama sphaerocarpa* and its understorey herbaceous vegetation always reciprocally positive? Competition–facilitation shift during *Retama* establishment. *Acta Oecologica*, 26:121-128.
- Ghanbari, A.; Dahmardeh, M.; Siahisar, B.A.; Ramroudi, M., 2010. Effect of maize (*Zea mays* L.) - cowpea (*Vigna unguiculata* L.) intercropping on light distribution, soil temperature and soil moisture in and environment. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 8:102-108.
- Guisso, T., 2009. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to growth and nutrient uptake by jujube and tamarind seedlings in a phosphate (P)-deficient soil. *African Journal of Microbiology Research*, 3:297-304.
- Hirota, I.; Sakuratani, T.; Sato, T.; Higuchi, H.; Nawata, E., 2004. A split-root apparatus for examining the effects of hydraulic lift by trees on the water status neighbouring crops. *Agroforestry Systems*, 60:181-187.
- Jackson, P.C.; Cavelier, J.; Goldstein, G.; Meinzer, F.C.; Holbrook, N.M., 1995. Partitioning of water resources among plants of a lowland tropical forest. *Oecologia*, 101:197-203.
- Jalonen, R.; Nygren, P.; Sierra, J., 2009. Transfer of nitrogen from a tropical legume tree to an associated fodder grass via root exudation and common mycelial networks. *Plant, Cell & Environment*, 32:1366-1376.
- Kizito, F.; Dragila, M.; Sène, M.; Lufafa, A.; Diedhiou, I.; Dick, R. P.; Selker, J. S.; Dossa, E.; Khouma, M.; Badiane, A.; Ndiaye, S., 2006. Seasonal soil water variation and root patterns between two semi-arid shrubs co-existing with Pearl millet in Senegal, West Africa. *Journal of Arid Environments*, 67:436-455.
- Lehmann, J.; Peter, I.; Steglich, C.; Gebauer, G.; Huwe, B.; Zech, W., 1998. Below-ground interactions in dryland agroforestry. *Forest Ecology and Management*,

111:157-169.

Lott, J.E.; Howard, S.B.; Ong, C.K.; Black, C.R., 2000. Long-term productivity of a *Grevillea robusta*-based overstorey agroforestry system in semi-arid Kenya: II. Crop growth and system performance. *Forest Ecology and Management*, 139:187-201.

Ludwig, F.; Dawson, T.E.; De Kroon, H.; Berendse, F.; Prins, H.H.T., 2003. Hydraulic lift in *Acacia tortilis* trees on an East African savanna. *Oecologia*, 134:293–300.

Ludwig, F.; Dawson, T.E.; Prins, H.H.T.; Berendse, F.; Kroon, H.; Agren, G., 2004. Below-ground competition between trees and grasses may overwhelm the facilitative effects of hydraulic lift. *Ecology Letters*, 7:623-631.

Molua, E.L. 2005. The economics of tropical agroforestry systems: the case of agroforestry farms in Cameroon. *Forest Policy and Economics*, 7:199-211.

Ong, C.K.; Black, C.R.; Wallace, J.S.; Khan, A.A.H.; Lott, J.E.; Jackson, N.A.; Howard, S.B.; Smith, D.M., 2000. Productivity, microclimate and water use in *Grevillea robusta*-based agroforestry systems on hillslopes in semi-arid Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 80:121-141.

Palma, J.H.N.; Graves, A.R.; Bunce, R.G.H.; Burgess, P.J.; Filippi, R.; Keesman, K.J.; Keulen, H.; Liagre, F.; Mayus, M.; Moreno, G.; Reisner, Y.; Herzog, F., 2007. Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 119:320-334.

Rasul, G.; Thapa, G.B., 2006. Financial and economic suitability of agroforestry as an alternative to shifting cultivation: The case of the Chittagong Hill Tracts, Bangladesh. *Agricultural Systems*, 91:29-50.

Reis, G.L.; Lana, A.M.Q.; Maurício, R.M.; Lana, R.M.Q.; Machado, R.M.; Borges, I.; Neto, T.Q., 2010. Influence of trees on soil nutrient pools in a silvopastoral system in the Brazilian Savannah. *Plant and Soil*, 320:185-193.

Siles, P.; Harmand, J.M.; Vaast, P., 2010. Effects of *Inga densiflora* on microclimate of coffee (*Coffea arabica*) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 78:269-286.

Simmons, M.T.; Archer, S.R.; Teague, W.R.; Ansley, R.J., 2008. Tree (*Prosopis glandulosa*) effects on grass growth: An experimental assessment of above- and belowground interactions in a temperate savanna. *Journal of Arid Environments*, 72:314-325.

Tornquist, C.G.; Hons, F.M.; Feagley, S.E.; Haggard, J., 1999. Agroforestry system effects on soil characteristics of the Sarapiquí region of Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 73:19-28.

Werthein, B.; Sevenster, J.G.; Eijs, I.E.M.; Alphen, J.J.M., 2000. Species diversity in a mycophagous insect community: the case of spatial aggregation vs. resource partitioning. *Journal of Animal Ecology*, 69:335-354.

Yang, L.; Liu, N.; Ren, H.; Wang, J., 2009. Facilitation by two exotic *Acacia*: *Acacia auriculiformis* and *Acacia mangium* as nurse plants in South China. *Forest Ecology and Management*, 257:1786-1793.