**PRODUÇÃO DE FORRAGEM DE CAPINS DO GÊNERO *Panicum*
E MODELAGEM DE RESPOSTAS PRODUTIVAS E
MORFOFISIOLÓGICAS EM FUNÇÃO DE VARIÁVEIS
CLIMÁTICAS**

LEONARDO SIMÕES DE BARROS MORENO

Dissertação apresentada à Escola Superior de
Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia, Área de Concentração: Ciência Animal e
Pastagens.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo – Brasil
Agosto – 2004

**PRODUÇÃO DE FORRAGEM DE CAPINS DO GÊNERO *Panicum*
E MODELAGEM DE RESPOSTAS PRODUTIVAS E
MORFOFISIOLÓGICAS EM FUNÇÃO DE VARIÁVEIS
CLIMÁTICAS**

LEONARDO SIMÕES DE BARROS MORENO

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. **CARLOS GUILHERME SILVEIRA PEDREIRA**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração: Ciência Animal e Pastagens.

P I R A C I C A B A

Estado de São Paulo – Brasil

Agosto - 2004

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Moreno, Leonardo Simões de Barros

Produção de forragem de capins do gênero *Panicum* e modelagem de repostas
produtivas e morfofisiológicas em função de variáveis climáticas / Leonardo Simões de
Barros Moreno. - - Piracicaba, 2004.
86 p.

Dissertação (mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2004.
Bibliografia.

1. Capins 2. Climatologia 3. Fisiologia vegetal 4. Forragem 5. Morfologia vegetal
6. Produção vegetal I. Título

CDD 633.2

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

DEDICO

Aos meus pais

MARIA ELENICE e JOSÉ (*in memorian*),

e à minha irmã ESTELA,

pelo amor, carinho e compreensão

em todos os momentos de minha vida.

MINHA ETERNA GRATIDÃO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Carlos Guilherme Silveira Pedreira, pela orientação, amizade e confiança, fundamentais para a realização desse trabalho.

Ao Eng. Agrônomo João Menezes de Souza Neto, com quem dividi a condução desse trabalho, pelo companheirismo e exemplo de conduta profissional.

Aos Profs. Drs. Marcos Silveira Bernardes, Sila Carneiro da Silva e Carlos Nabinger e à Dra. Patrícia Menezes Santos pela colaboração e pelas valiosas sugestões, importantes no desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos e colegas Bruno Carneiro e Pedreira, Daniel de Castro Rodrigues, Gustavo José Braga, Henrique Rocha de Medeiros, Felipe Tonato, Lyssa Otani e Marília Gabriela Faustino pelo companheirismo e auxílio na condução do experimento, pelas sugestões e idéias e pela amizade, imprescindíveis durante o transcorrer do trabalho.

Aos colegas do Programa de Pós-graduação em Ciência Animal e Pastagens pelo exemplo de dedicação, pela convivência alegre e constantes trocas de experiência.

Ao estagiário Flávio Mazzaro de Freitas pelo auxílio imprescindível e pela competência na coleta de dados.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela concessão de bolsa de estudos e suporte financeiro para a execução do trabalho.

SUMÁRIO

Página

RESUMO.....	vii
SUMMARY.....	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 O Gênero <i>Panicum</i>	3
2.1.1 Origem do gênero <i>Panicum</i> e introdução no Brasil.....	3
2.1.2 Variabilidade genética e cultivares do gênero <i>Panicum</i>	4
2.1.3 Potencial de produção.....	5
2.2 Determinantes ambientais da produção de forragem: racionalizando a estacionalidade da produção em função de fatores climáticos.....	7
2.2.1 Água.....	9
2.2.2 Luz.....	10
2.2.3 Temperatura.....	11
2.2.4 Modelos preditores de respostas das culturas aos fatores climáticos.....	13
2.3 Características estruturais do dossel e seu impacto sobre o uso da radiação incidente.....	15
2.3.1 Índice de Área Foliar (IAF).....	15
2.3.2 Ângulos foliares.....	17
2.3.3 Altura.....	18
2.4 A fotossíntese foliar e do dossel como determinantes da produção de forragem..	19
2.5 Modelagem como ferramenta para o estudo e o planejamento da produção.....	22
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	25

3.1 Local do experimento, dados climáticos, delineamento experimental e tratamentos.....	25
3.2 Manejo de cortes, da adubação e da irrigação.....	27
3.3 Massa e acúmulo de forragem.....	30
3.4 Cálculo de Unidade Fototérmica (UF).....	30
3.5 Composição do modelo de produção de forragem.....	32
3.6 Índice de área foliar (IAF), Interceptação Luminosa (IL), Ângulos Foliares e Fotossíntese de Folhas individuais.....	33
3.7 Simulação da fotossíntese de dossel.....	34
3.8 Altura do dossel.....	35
3.9 Análise dos dados.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1 Produção de forragem.....	38
4.1.1 Acúmulo total de forragem.....	38
4.1.2 Estacionalidade de produção.....	40
4.2 Efeito dos fatores climáticos sobre as respostas produtivas dos capins do gênero Panicum.....	41
4.2.1 Temperatura base inferior (T _{Bi}).....	41
4.2.2 Temperatura, fotoperíodo e produção de forragem.....	44
4.2.3 Ajuste dos modelos de produção baseados na Unidade Fototérmica.....	46
4.3 Características morfofisiológicas e sua resposta a fatores climáticos.....	52
4.3.1 Componentes do acúmulo de forragem.....	52
4.3.2 Fotossíntese, IAF e Interceptação Luminosa.....	55
4.3.3 Altura do dossel.....	64
5 CONCLUSÕES.....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

**PRODUÇÃO DE FORRAGEM DE CAPINS DO GÊNERO *Panicum*
E MODELAGEM DE RESPOSTAS PRODUTIVAS E MORFOFISIOLÓGICAS
EM FUNÇÃO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS**

Autor: LEONARDO SIMÕES DE BARROS MORENO

Orientador: Prof. Dr. CARLOS GUILHERME SILVEIRA PEDREIRA

RESUMO

A pecuária brasileira é baseada no uso de pastagens tropicais, com elevado potencial produtivo, que se beneficiam das condições ambientais favoráveis ao longo de todo o ano. Entretanto, o padrão estacional do clima, principalmente da pluviosidade, da temperatura e do fotoperíodo, determinam a maior concentração da produção de forragem nos períodos de primavera e verão. O conhecimento das respostas produtivas e morfofisiológicas das principais espécies e cultivares forrageiros à temperatura e ao fotoperíodo, na ausência de déficit hídrico, poderão permitir o desenvolvimento de modelos preditores de produção para o planejamento da atividade pecuária ao longo do ano. O presente estudo foi conduzido no Departamento de Zootecnia da ESALQ/USP em Piracicaba, SP, de dezembro de 2002 a abril de 2004, com o objetivo de gerar um banco de dados sobre as características produtivas e morfofisiológicas de capins do gênero *Panicum* e, a partir desses dados, desenvolver modelos que descrevessem o acúmulo de forragem e as características do dossel em função de uma variável que combina os efeitos de temperatura e fotoperíodo (a Unidade Fototérmica – UF). Foram

utilizados cinco cultivares de *Panicum spp.* (Atlas, Massai, Mombaça, Tanzânia e Tobiatã) cortados a cada 28 (Atlas, Massai e Mombaça) ou 35 (Tanzânia e Tobiatã) dias durante o verão agrostológico (21 de setembro a 22 de março) e 49 (Atlas, Massai e Mombaça) ou 63 (Tanzânia e Tobiatã) dias durante o ‘inverno’ (23 de março a 20 de setembro), deixando-se um resíduo de 35 cm para os capins Atlas, Massai e Mombaça e 15 cm para o capim Massai. As unidades experimentais (parcelas de 10 H 4 m) eram irrigadas para garantir ausência de déficit hídrico e adubadas com o equivalente a 250 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ no ‘verão’, resultando num total anual de aproximadamente 450 kg N ha⁻¹. O delineamento experimental foi de blocos completos casualizados com quatro repetições. Em cada corte ao longo do experimento, foi medido o acúmulo de forragem e, a partir daí, foram calculadas a produção anual de forragem, a produção de verão e a produção de inverno. Acompanharam-se semanalmente duas rebrotações de verão e, bi-semanalmente, uma rebrotação de inverno, quando foram avaliados a massa do resíduo, o acúmulo de forragem, a altura, o índice de área foliar (IAF), os ângulos foliares e a interceptação luminosa (IL) do dossel e as taxas de fotossíntese foliar dos capins, que foram utilizadas para a simulação da taxa de fotossíntese do dossel.

O capim Massai produziu 30 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹, seguido dos capins Mombaça, Tanzânia e Tobiatã que acumularam 20 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹ e Atlas (12 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹). Durante o verão os capins Massai e Mombaça foram os mais produtivos com o acúmulo de 18 Mg MS ha⁻¹, seguidos dos capins Tanzânia e Tobiatã com o acúmulo de 14 Mg MS ha⁻¹ e do capim Atlas, com acúmulo de 8,5 Mg MS ha⁻¹. Durante o inverno Massai, Tanzânia e Tobiatã acumularam 7,5 Mg MS ha⁻¹ enquanto Atlas e Mombaça acumularam 3,7 Mg MS ha⁻¹, o que resultou na maior estacionalidade de produção do Mombaça, com 80% da produção concentrada no verão, enquanto os demais capins apresentaram em média 70% da produção nesse período.

Embora o capim Massai tenha sido o mais produtivo, suas taxas de fotossíntese de dossel foram as menores (1,08 mg CO₂ m⁻² s⁻¹), o que pode estar relacionado com a maior proporção de folhas na massa de forragem. O IAF médio do Massai (2,0) foi menor que o dos demais capins (2,25 a 2,68), e a sua massa residual (4 Mg MS ha⁻¹) foi quase a metade da média dos demais cultivares (7 Mg MS ha⁻¹). Isso deu origem a uma

menor ‘diluição’ da massa de folhas na massa total, o que fez com que a maior parte da massa de forragem fosse constituída por folhas (órgãos fotossintetizantes).

Os modelos de acúmulo de forragem, acúmulo de folhas, IAF, IL e altura do dossel foram sempre diferentes entre cultivares e estações. Os modelos para acúmulo de forragem forneceram produções previstas próximas àquelas observadas, embora durante o inverno e início do verão tenham havido sub e super-estimativas, principalmente para Atlas e Tanzânia. Os modelos permitiram, todavia, a determinação do momento da rebrotação em que ocorre a máxima taxa média de acúmulo uma descrição das características morfofisiológicas do dossel nesse momento, tanto para as rebrotações de verão como de inverno. O uso da UF mostrou-se efetivo na predição de características produtivas e no estudo de alguns atributos morfofisiológicos de gramíneas do gênero *Panicum*. Para que os modelos possam se tornar ferramentas práticas de planejamento de sistemas de produção, há, no entanto, a necessidade de que estudos complementares sejam realizados, aumentando o banco de dados disponível e a amplitude de condições de ambiente e manejo contempladas.

**FORAGE YIELD OF *Panicum* GRASSES AND MODELING YIELD,
MORPHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL TRAITS
IN RESPONSE TO CLIMATIC VARIABLES**

Author: LEONARDO SIMÕES DE BARROS MORENO

Adviser: Prof. Dr. CARLOS GUILHERME SILVEIRA PEDREIRA

SUMMARY

The Brazilian livestock industry is based on the use of tropical pastures with high production potential which benefits from favorable environmental conditions over the year. However, the seasonal pattern of climatic conditions, mainly temperature and daylength, concentrates most of the annual forage accumulation during the spring and summer. Thus, knowing the yield, morphological and physiological responses of forages to temperature and daylength, in the absence of moisture constraints, may allow for the development of prediction models, which can be useful in planning forage-livestock systems. This study was carried out at the Departamento de Zootecnia of ESALQ-USP in Piracicaba, SP, from December 2002 through April 2004, with the purpose of generating a comprehensive dataset on the productive, morphological and physiological characteristics of *Panicum* spp. and, from this dataset, develop and evaluate models that describe forage accumulation and sward characteristics as related to photothermal units (a climatic variable which combines the effects of temperature and daylength). Five cultivars of *Panicum* spp. were used in the study: Atlas, Massai, Mombaça, Tanzânia

and Tobiata, harvested either every 28 (Atlas, Massai and Mombaça) or 35 (Tanzânia and Tobiata) days during the ‘summer’ (from 21 September to 22 March) and every 49 (Atlas, Massai and Mombaça) or 63 (Tanzânia and Tobiata) days during the ‘winter’ (from 23 March to 20 September), leaving a stubble of 35 cm for Atlas, Mombaça, Tanzânia and Tobiata and 15 cm for Massai. Plots (10 H 4 m) were irrigated to avoid water deficit and fertilized with 250 kg N ha⁻¹ during the ‘summer’, resulting in total annual rates of approximately 450 kg N ha⁻¹. The experimental design was a randomized complete block with four replications. On each harvest, forage accumulation was measured on every plot and, from these data, annual and seasonal production for ‘summer’ and ‘winter’ were calculated. Additionally, two ‘summer’ regrowths and a ‘winter’ regrowth, were characterized every week or every two weeks, respectively, by measuring residual mass, forage accumulation, sward height, leaf area index (LAI), mean foliage tilt angle, light interception (LI) and leaf photosynthesis, from which canopy photosynthesis was calculated.

Massai was the most productive grass, with total annual yield of 30 Mg DM ha⁻¹, followed by Mombaça, Tanzânia and Tobiata, which yielded 20 Mg DM ha⁻¹yr⁻¹ on average, and by Atlas with annual yield of 12 Mg DM ha⁻¹. During the ‘summer’ Massai and Mombaça had similar yields of 18 Mg DM ha⁻¹, followed by Tanzânia and Tobiata which yielded a mean 14 Mg DM ha⁻¹, and by Atlas which yielded 8,5 Mg DM ha⁻¹. During the ‘winter’ Massai, Tanzânia and Tobiata yielded 7,5 Mg DM ha⁻¹ while Atlas and Mombaça yielded 3,7 Mg DM ha⁻¹, resulting in a more pronounced seasonal growth pattern of Mombaça, which concentrated 80% of its production in the ‘summer’ compared to the other grasses where this value was 70%.

Despite being the highest yielding grass, Massai had the lowest canopy photosynthesis rates (1,08 mg CO₂ m⁻² s⁻¹) and this may be related to the higher leaf proportion in the forage mass. The mean LAI of Massai swards (2.0) was lower than that of the other grasses (2.25 to 2.68) and the residual forage mass on Massai plots (4 Mg DM ha⁻¹) was about half of that of the other grasses (7 Mg DM ha⁻¹ on average). This

generated less of a 'dilution effect' of the leaf mass on the total forage mass, and most of total forage mass of Massai came from leaves (photosynthesizing organs).

The models that describe the evolution of forage mass and leaf mass above the stubble, as well as LAI, LI and sward height differed among cultivars and between seasons. The forage accumulation models provided yield estimates that were consistent with observed values, although under and overestimations occurred, mainly for Atlas and Tanzânia during the 'winter' and early 'summer'. These models, however, allowed for the identification of the point of maximum average growth rate during the regrowth, as well as the characterization of the canopy morphological and physiological characteristics at that point in time, for both 'summer' and 'winter' regrowths. The use of models based on the photothermal unit proved effective for the prediction of yield and yield-related responses of *Panicum* grasses. In order for these models to become useful tools for systems planning and management, further study is needed in addition to bigger and richer data libraries and a wider range of environments and management practices.

1 INTRODUÇÃO

A crescente abertura de mercados para produtos como a carne e o leite brasileiros, além do crescimento de outras atividades pecuárias como a ovinocultura, vêm fazendo com que as áreas de pastagens comecem a deixar de ser vistas como áreas marginais e passem a ser consideradas parte importante de um sistema de produção lucrativo, capaz de competir com os demais setores da produção agrícola. As pastagens são o principal suprimento alimentar utilizado na pecuária brasileira, o que deve ser encarado como uma poderosa ferramenta de redução de custos. Além da existência de espécies tropicais de elevado potencial produtivo, este é o meio de alimentação mais barato, pois é o próprio animal quem colhe a forragem. Por isso, a utilização e o manejo dessas áreas devem ser realizados de maneira profissional, buscando eficiências ótimas de produção e utilização, e para que os potenciais benefícios à lucratividade do sistema de produção sejam obtidos.

O conhecimento das respostas de pastagens de clima temperado ao ambiente em que estão inseridas e ao manejo a que são submetidas é bastante amplo, principalmente naqueles países em que a produção animal baseada em pastagens tem papel importante na cadeia de produção agropecuária (como é o caso da Grã-Bretanha, França e Nova Zelândia). A aplicação de tal conhecimento para plantas tropicais vem se mostrando possível, principalmente para respostas relativas à ecologia de populações, embora a ordem de grandeza de tais respostas seja diferente (Hodgson & Silva, 2002). Como a quantidade desse tipo de informação ainda é pequena no Brasil, é fundamental a

construção de um banco de dados consistente e abrangente, que amplie os conhecimentos sobre as forrageiras tropicais e subsidie as tomadas de decisão.

A geração de informações detalhadas sobre as diferentes espécies forrageiras utilizadas no Brasil é, portanto, fundamental para que a produtividade da pecuária nacional possa acompanhar a crescente demanda do mercado. Bancos de dados abrangentes e o desenvolvimento de modelos que permitam a simulação de cenários diferentes poderão ser de grande valia para o planejamento do sistema produtivo e no suporte às tomadas de decisão, podendo favorecer a produção de forragens (quantitativa e qualitativamente), não só visando um incremento na produção animal mas, também, na eficiência global do sistema produtivo (Rolim, 1980).

O presente estudo teve por objetivo avaliar características morfológicas (composição morfológica), fisiológicas (fotossíntese de folhas individuais e, por modelagem, fotossíntese de dossel), estruturais (IAF, interceptação luminosa, ângulos foliares e altura do dossel) e produtivas (acúmulo de forragem) de cinco cultivares de capins do gênero *Panicum* (Atlas, Massai, Mombaça, Tanzânia e Tobiatã) ao longo de 14 meses. Características estruturais e fisiológicas permitiram a estimativa das taxas de fotossíntese de dossel. A integração dessas informações em modelos de resposta às variáveis climáticas, associadas às diferenças morfofisiológicas inerentes aos cultivares utilizados, auxiliaram na explicação das diferenças produtivas observadas. Os modelos foram desenvolvidos com o objetivo de permitir o planejamento e a adoção de estratégias que garantam produtividade e eficiência aos sistemas de produção baseados no uso de pastagens.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Gênero *Panicum*

2.1.1 Centros de origem do gênero *Panicum* e sua introdução no Brasil

O principal centro de origem dos capins do gênero *Panicum* é a África tropical (Parsons, 1972), sendo encontradas formas nativas até a África do Sul, em margens de florestas, como capim pioneiro ocupando o solo recém-desmatado e em pastagens sob sombra rala de árvores. Seu habitat abrange altitudes desde o nível do mar até 1.800 m (Jank, 1995). Existem controvérsias com relação à data e à forma de introdução de capins do gênero *Panicum* no Brasil. Segundo ParsonS (1972), a introdução no Brasil desses capins, bem como a de outras espécies de gramíneas africanas, se deu durante o período áureo do comércio de escravos africanos para as colônias americanas (século XVIII) quando sua palha era utilizada como cama nos navios negreiros. Outra versão, atribui a introdução desses capins a Tomé de Sousa, no século XVI (Parsons, 1972).

A capacidade de utilizar eficientemente altas intensidades de luz associadas com a formação de clareiras na vegetação, desenvolvimento rápido e grande produção de sementes confere às plantas do gênero *Panicum* a classificação de plantas pioneiras (Dias-Filho, 1995). A notável adaptação dessas plantas aos tipos de solo e ao clima brasileiros aliados à rápida substituição de áreas de floresta da América tropical por áreas de agricultura (Parsons, 1972) favoreceram a ampla disseminação das espécies de *Panicum* pelo Brasil. Além disso, atributos como elevadas taxas de crescimento, capacidade de suportar períodos de seca e a boa qualidade da forragem produzida chamaram a atenção depecuaristas, que passaram a implantar grandes áreas de pastagens

com capins do gênero *Panicum* a partir da segunda metade do século XX (Aronovich, 1995).

2.1.2 Variabilidade genética do gênero *Panicum*

Jank (1995) descreveu a situação atual dos programas de melhoramento genético de gramíneas do gênero *Panicum* no Brasil. O caráter apomítico da reprodução da maioria das espécies de *Panicum* aumenta a importância da coleta de materiais nos centros de origem a fim de garantir a variabilidade necessária (coleções de materiais que representem a variabilidade natural) a programas de melhoramento genético.

Diversas foram as introduções no Brasil de material genético do gênero *Panicum*, alguns trazidos da África, como é o caso do cultivar Aruana (Instituto de Zootecnia, 1979), outros desenvolvidos por outros países como os cultivares Gatton e Hamil lançados na Austrália (Jank, 1995) e o Tobiatã, lançado pelo ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération) na Costa do Marfim e em seguida pelo IAC (Instituto Agronômico de Campinas) no Brasil (Usberti Filho, 1982). Além disso, o convênio firmado em 1982 entre a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e o ORSTOM (Jank et al., 1990), detentor da mais ampla coleção do gênero, favoreceram grandes avanços no melhoramento genético do gênero *Panicum*, colocando-o em evidência.

Aronovich (1995) citou vários cultivares já lançados porém atualmente em desuso como o Colômbio (que já foi o mais plantado no país e provavelmente foi a forma como o gênero *Panicum* foi introduzido no Brasil, originário do oeste africano), Búfalo, Gatton Panic e Green Panic (provenientes da Austrália), Guiné, Makueni (originário do Quênia) e Sempre Verde. Em 1986 e 1988 foram lançados pelo IAC os cultivares Centenário e Centauro; em 1990 o Centro de Pesquisas Agropecuárias dos Cerrados (EMBRAPA – CPAC) lançou o cv. Vencedor. Também em 1990 foi lançado o cultivar Tanzânia –1 pelo Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte (EMBRAPA – CNPGC). Em 1993 a mesma instituição lançou o cultivar Mombaça (Jank, 1995) e,

mais recentemente (2001) foi lançado o cultivar Massai (EMBRAPA GADO DE CORTE, 2001).

A falta de estudos aprofundados sobre as diferenças morfológicas, bastante enfatizadas por Jank (1995), e fisiológicas entre os materiais lançados, sobre o impacto que tais diferenças têm na eficiência de utilização de recursos do meio e, em última instância em produtividade, impede que avanços direcionados ocorram.

2.1.3 Potencial de produção

O elevado potencial produtivo dos capins do gênero *Panicum* tem sido amplamente documentado na literatura. Avaliando 18 variedades na Costa do Marfim, Pernès et al.¹, citados por Jank et al. (1994), encontraram produções de 24 a 38 t ha⁻¹ de MS. Em revisão da literatura, Herling et al. (2000) reportaram produções de verão de 7 a 24 t de MS ha⁻¹ e de 0,8 a 7 t de MS ha⁻¹ no inverno (Tabela 1). Braga (2001) encontrou resposta linear do cultivar mombaça à adubação nitrogenada, com produções no verão variando de 11 a 61 t de MS ha⁻¹ no verão com 0 a 500 kg N ha⁻¹ respectivamente ao longo do verão. Santos et al. (1999) relataram para os cultivares Mombaça e Tanzânia respectivamente, produções médias de 5,5, 8 e 9 t de MS ha⁻¹ e 4,5, 6 e 7 t de MS ha⁻¹ por pastejo usando intervalos de pastejo de 28, 38 e 48 dias, de setembro a maio. Pedreira & Rosseto (2002) encontrou acúmulos de forragem variando de 1,2 a 4 t de MS ha⁻¹ por ciclos de pastejo de 35 dias durante o período das chuvas.

¹ PERNÈS, J.; RENÉ, J.; RENÉ-CHAUME, R. et al. *Panicum maximum* (Jacq.) et l'intensification forragère en Côte d'Ivoire. **Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux**, Paris, v.28, n.2, p.239-264.

Tabela 1. Produção de forragem (Mg MS ha⁻¹) de três cultivares de *Panicum maximum* Jacq., em diferentes localidades, com diferentes adubações, submetidos a corte ou pastejo

Cultivar	Local	Manejo	Produção		Adubação	Referência
			Período			
			Verão	Inverno		
			Mg MS ha ⁻¹	kg ha ⁻¹		
Tanzânia	Maringá, PR	Corte	7,4	2,7	1,50% *	CECATO et al.(1996)
Tanzânia			14,4	4,3		
Tobiatã	Maringá, PR	Corte	18	3,6	1,50% *	CECATO et al.(2000)*
Mombaça			20,5	5		
Tobiatã	Pirussununga, SP	Corte	7,6	1,1	240	LUZ et al.(1997)
Tobiatã	Pirussununga, SP	Corte	11	0,86	300	LUZ et al.(1998)
Mombaça			19	-		
Tanzânia	São Carlos, SP	Corte	18	-	400	CORRÊA et al. (1998)
Tobiatã			19,2	-		
Tobiatã	São Carlos, SP	Pastejo	30	3,4	430	TEIXEIRA et al. (1999)
Tanzânia	São Carlos, SP	Pastejo	23,6	5,9	320	TOSI (1999)
Tanzânia	Piracicaba, SP	Pastejo	27		800	PENATI (2002)**
Mombaça	Araras, SP	Pastejo	16,5	6	195	UEBELE (2002)**

* quantidade de N aplicada em função do acúmulo de forragem

** média geral do experimento

Adaptado de Herling et al. (2000)

Para o valor nutritivo da forragem, quando comparado sob as mesmas condições (i.e. estado fisiológico), a variabilidade é pequena entre cultivares e até entre espécies e gêneros de gramíneas forrageiras tropicais, comparativamente às variações observadas entre idades fisiológicas (Euclides, 1995). Isso dificulta a comparação dos resultados disponíveis na literatura que, em sua maioria, resultam da análise da forragem colhida em idades fisiológicas distintas (períodos de crescimento diferentes). Melhor valor nutritivo foi reportado quando a forragem foi colhida mais jovem (Braga, 2001;

Bueno, 2003). Reid et al. (1973) reportaram taxas de redução na digestibilidade in vitro da matéria seca de 0,1 a 0,4 unidades percentuais por dia de rebrotação.

Características como elevada produtividade agronômica e bom valor nutritivo, sugerindo aptidão para alto desempenho e produtividade animal são atributos desejáveis e se enquadram na proposta de exploração animal intensiva, buscando máxima lucratividade e produtividade elevada. Apesar disso, dados médios ao longo de estações de pastejo inteiras ou mesmo de anos completos, ecerram variações entre desfolhas (principalmente por ocorrerem com a planta em idades fisiológicas diferentes). Brâncio et al. (2002) observaram que é no início do período chuvoso que a planta apresenta maior valor nutritivo quando pastejada a cada 35 dias. Isso provavelmente ocorre porque nesse período, após 35 dias de crescimento, a planta esteja fisiologicamente mais jovem que em outros períodos do verão agrostológico (outubro a abril).

Assim, o conhecimento das variações na produção de forragem e na qualidade da forragem produzida, ao longo do ano, dentro de estações ou em rebrotações específicas, bem como a resposta da planta a práticas de manejo, é fundamental para que se conheça as características da forragem oferecida aos animais e assim, antever as respostas do sistema de produção.

2.2 Determinantes ambientais da produção de forragem: racionalizando a estacionalidade da produção em função de fatores ambientais

A maioria dos setores da atividade pecuária é passível de planejamento e um dos principais é a produção de alimento. No caso de planejamento da alimentação baseada em pastagens, a principal dificuldade está na estacionalidade produtiva que as gramíneas forrageiras apresentam. Crescimento muito rápido, num curto período de tempo, embora possa resultar em altas produções de forragem, pode não significar alta produção animal, devido ao longo período de escassez de alimento no restante do ano (Pedreira, 1972). Diversos trabalhos mostraram que as produções de plantas forrageiras na região centro-sul brasileira concentram-se no período quente e chuvoso do ano (de outubro a março)

correspondendo a cerca de 70 a 90% da produção total, enquanto no inverno (de abril a setembro) ocorre uma produção da ordem de 10 a 30% da produção total anual (Pedreira, 1972; Ghelfi Filho, 1972; Corsi, 1972; Rolim, 1980; Pedreira & Mattos, 1981; Müller, 2000 e Tonato, 2003)). Pedreira & Mattos (1981), estudando a estacionalidade de 25 capins no Estado de São Paulo, encontraram concentrações da produção no verão (% da produção anual) de 94% para a espécie mais estacional (*Digitaria valida* Stent – cv. valida) e 77% para as menos estacionais (*Andropogon gayanus* – var. *squamulatus* – Gamba e *Cynodon dactylon* L. Pers – cv. Coastcross 1).

Vários são os fatores determinantes da produção de forragem, dentre os quais temperatura do ar, radiação solar, fotoperíodo e umidade do solo são considerados os principais. Pedreira (1972) encontrou curvas de taxa de acúmulo acompanhando as curvas de precipitação durante o verão, enquanto Corsi (1972) também atribuiu a concentração da produção forrageira no verão à temperatura e ao fotoperíodo favoráveis durante esta época do ano.

As condições ambientais afetam também outros aspectos relacionados à produção. Diez & Perez¹, citados por Monteiro (1996) estudaram Coastcross - 1 (*Cynodon* spp.) e grama estrela (*C. nlemfuënsis* Vanderyst) cultivares Jamaicana e Panamenha, recebendo nitrogênio nas doses de 0, 100, 200 e 300 kg ha⁻¹ época do ano⁻¹ (seca e chuvas). Os autores mediram eficiência de uso do nitrogênio quatro a cinco vezes maior no período das chuvas que no período seco. Paciullo (1997) relatou que a eficiência do uso do nitrogênio apresentou amplitude de 7 a 54 kg MS para cada kg de N aplicado. Pedreira (1972) relatou haver pequeno ou nenhum acréscimo na produção de forragem em função da adubação nitrogenada durante a seca. O autor não verificou variações no número médio de perfilhos nas pastagens durante o inverno, porém variações no peso dos perfilhos foram significativas, sugerindo que essa seja a causa da redução da produção durante o inverno.

¹ DIEZ, J.; PEREZ, P. Efecto de la fertilización nitrogenada en el comportamiento de ocho gramíneas. **Ciencia y Técnica en la Agricultura, Pastos y Forrages, La Habana**, v. 6, n. 1, p.7-15, 1983.

2.2.1 Água

A água é constituinte fundamental dos vegetais e atua em diversas funções vitais à planta (transporte e deslocamento de solutos, como reagente no metabolismo básico – fotossíntese e respiração, na turgescência celular, na definição de forma e estrutura de órgãos, na abertura e fechamento de estômatos, na penetração do sistema radicular no solo, crescimento e expansão celular) (Lucchesi, 1987). A maior sensibilidade da expansão celular ao estresse hídrico em relação à divisão celular faz com que a expansão foliar seja reduzida até sob condições leves de estresse hídrico; além disso, a manutenção do turgor é realizada por meio da regulação osmótica e, os custos metabólicos de síntese e transporte de materiais para esse fim, são priorizados em relação ao crescimento (Marshall, 1980).

O uso de irrigação em pastagens, embora não apresente alicerces sólidos na pesquisa científica, é uma realidade na região do cerrado (Müller, 2000). Apesar de a água ser um fator que atua diretamente no desenvolvimento das plantas, suas interações com outros fatores também determinantes ao crescimento vegetal, fazem com que as respostas à irrigação nem sempre atendam às expectativas de produção. Monteiro (1996) descreveu os trabalhos de Fernandez et al.¹ e Clavel et al.² em que a eficiência do uso do nitrogênio aumentou com o uso da irrigação durante o período seco do ano, tendo sido porém mais baixa que aquelas durante o período chuvoso. Ghelfi Filho (1972) não encontrou variações significativas na distribuição estacional de produção de forragem no capim elefante cv. Napier (*Pennisetum purpureum* Schum.) irrigado quando comparado à testemunha não irrigada durante os meses de abril a setembro, o que pode ser explicado pelas baixas temperaturas durante o período associadas a dias mais curtos, embora o uso da irrigação no inverno tenha proporcionado um acréscimo de 28-30% em relação à produção de inverno sem irrigação. No trabalho de Botrel et al. (1991) as taxas médias de acúmulo para cultivares de *P. purpureum* foram cerca de quatro vezes

¹ FERNANDEZ, D.; PARETAS, J.J.; FONSECA, E. Influencia de la fertilización con nitrogenio y la frecuencia de corte en bermuda cruzada 1 (coastcross 1) con riego y sin el. 1. Rendimiento y economia. **Ciencia y Técnica en la Agricultura, Pastos y Forrages, La Habana**, v.12, n.1, p.41-55, 1989.

² CLAVEL, M. PARETAS, J.J.; SUAREZ, J.J.; et al. Diferentes niveles y formas de aplicar el nitrogenio en cuatro gramíneas tropicales. **Agrotecnica de Cuba, La Habana**, v. 23, n.1, p.16-20, 1991.

superiores em pastagens irrigadas em relação às não irrigadas durante o inverno, sem alterar, no entanto, a estacionalidade da produção da gramínea estudada. De forma análoga, Soto (1981) destacou as baixas respostas à irrigação na época seca no que diz respeito a incrementos na produção forrageira.

A decisão de adotar-se ou não a prática de irrigação em pastagens, principalmente durante o período seco do ano, depende da análise econômica do contexto em que o sistema está inserido. Embora proporcione pouca vantagem quanto à distribuição estacional da produção, o pequeno incremento na produção aliado à melhora na eficiência de fertilizantes nitrogenados podem ser compensadores. Para tanto, estudos de viabilidade econômica, em diferentes cenários, são imprescindíveis.

2.2.2 Luz

A fotossíntese realizada por uma planta é influenciada, em primeira instância, pela luz incidente (Bernardes, 1987). Segundo Hughes (1970), não é incomum na Grã-bretanha, a produção de forragem no verão ser significativamente limitada pela redução da radiação solar, que chega a cair de $550 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para $65\text{-}75 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (provavelmente devido à ocorrência de dias chuvosos), enfatizando a grande importância da luz para o crescimento das plantas. De acordo com Soto (1981), para o Brasil Central, a radiação solar recebida em maio, junho, julho e agosto equivale a 66% daquela de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. Esse decréscimo, aliado à entrada de massas de ar frio provenientes da região Antártica e à diminuição do fotoperíodo, determina uma acentuada variação estacional da produção das plantas forrageiras.

Quando os demais fatores de produção são mantidos a um nível constante e não limitante, a produção de massa seca é diretamente proporcional à quantidade de folhas expostas à radiação solar (Dovrat, 1993). Quando a superfície das folhas é perpendicular à radiação não atenuada, sua taxa de fotossíntese individual é máxima, porém, pode ser reduzida se a radiação for atenuada por menores ângulos de incidência ou por sombreamento (provocado por outras folhas inseridas acima no dossel) (Brown & Blaser, 1968). A estrutura do dossel exerce, portanto, um papel fundamental nos mecanismos de

interceptação luminosa, produtividade e evapotranspiração (Welles & Norman, 1991) e representa uma importante informação para a descrição da interação entre a vegetação e o meio em que se encontra. Brougham (1956) relatou a relação estreita entre interceptação luminosa e o índice de área foliar (IAF) e entre este último e a taxa de acúmulo de forragem.

Dovrat (1993) salientou que o regime de radiação favorável ao crescimento das plantas associado aos céus limpos e dias longos nas regiões áridas em comparação com outras regiões é a maior razão pela qual zonas áridas têm grande potencial para suportar elevadas produções de massa seca ano a ano, desde que sejam providos água e nutrientes às plantas.

2.2.3 Temperatura

As baixas temperaturas noturnas em algumas regiões dos trópicos são apontadas como um dos principais agentes causadores da estacionalidade de crescimento de plantas forrageiras tropicais. Segundo Cooper (1970), entre 20 e 30° de latitude encontram-se as regiões do globo onde ocorre o maior aporte anual de energia solar. Entretanto, nessas áreas a produção potencial não é a maior devido a limitações na temperatura durante o período de inverno.

Um dos principais problemas da interpretação de resultados experimentais em ambientes sob condições controladas pode ser a dificuldade de se separar os efeitos de luz (fotoperíodo e intensidade de luz) e temperatura no crescimento de plantas (Rolim, 1980). Segundo Corsi (1976) e Bauer et al. (1984) o efeito da temperatura é mais relevante, mas a importância relativa de cada fator, no campo, é difícil de ser quantificada.

Taxa de aparecimento de folhas (TAF), taxa de expansão de folhas (TEF) e duração de vida da folha (DVF) são as variáveis que melhor descrevem a morfogênese de plantas forrageiras e, embora definidas geneticamente, são fortemente influenciadas

por condições do ambiente, dentre elas a temperatura (Lemaire & Chapman, 1996). A TAF (folhas por dia) é o inverso do filocrono, que é o intervalo de tempo entre a expansão de duas folhas consecutivas (Klepper et al., 1982). Bauer (1984) trabalhando com trigo, obteve boa explicação dos dados de filocrono a partir do acúmulo de graus-dia ($R^2=0,98$), mostrando a estreita relação dessa característica com variações na temperatura ambiente.

Como o surgimento de cada folha reflete o surgimento de um fitômero, contendo pelo menos uma gema capaz de gerar um perfilho, pode-se esperar que o surgimento de perfilhos também acompanhe o acúmulo de graus-dia (Klepper et al., 1982 e Nabinger & Pontes, 2001). A TEF responde imediatamente a qualquer mudança de temperatura na região do meristema apical de forma exponencial (Peacock, 1975a, b). Na maioria das gramíneas temperadas, a resposta da TEF à temperatura média diária é exponencial entre 0 e 12 °C e linear acima destes valores, pelo menos até que valores ótimos (entre 20 e 25 °C, conforme a espécie) sejam atingidos (Nabinger & Pontes, 2001). A DVF e, por consequência a senescência foliar, são influenciadas pela temperatura da mesma forma que a TAF. Assim, quando um perfilho atinge um número máximo de folhas vivas passa a haver um equilíbrio entre a TAF e a senescência das folhas que ultrapassaram o seu período de duração de vida (Nabinger & Pontes, 2001).

Apesar da relação entre os processos morfogênicos e a temperatura, Peacock (1975a) encontrou baixas correlações entre produção de forragem e temperatura média, consequência da diferença na escala temporal entre as medidas de temperatura (medidas diariamente) e produção de forragem (medida a intervalos maiores de tempo), quando o objetivo era estudar as respostas de azevém às variações da temperatura em curto prazo.

Além dos efeitos sobre a morfogênese, Cooper & Tainton (1968) relataram um aumento no crescimento relativo das raízes e redução na área foliar específica de plantas tropicais sob baixas temperaturas. A temperatura limite, inferior (T_{Bi}) ou superior, a partir da qual não ocorre mais crescimento vegetativo é chamada temperatura base. Para gramíneas tropicais, poucas referências são feitas à temperatura base superior já que o valor que limitaria o crescimento dessas plantas seria bastante alto e dificilmente atingido em condições naturais de ambiente. No entanto, Mello et al. (2001)

encontraram reduções na taxa máxima de fotossíntese foliar de *P. maximum* cv. Tanzânia em temperaturas acima de 35 °C, o que está dentro da faixa de valores ótimos reportada por Cooper & Tainton (1968) para plantas tropicais. O limite inferior é mais facilmente atingível nas áreas tropicais, principalmente em áreas de maior altitude e nas regiões de maior latitude durante períodos específicos do ano (inverno agrostológico – maio a setembro).

O conhecimento da TBi permite o zoneamento de áreas ideais para algumas espécies, além de determinar áreas de maior sucesso para o emprego de tecnologias como a irrigação. Alguns modelos de previsão de produção, como os baseados em Graus-Dia e Unidades Fototérmicas, utilizam o conceito de TBi, o que aumenta a necessidade por informações menos generalistas. Variações de até 13% nas TBi foram relatadas por Tonato (2003) para capins do gênero *Cynodon*, o que indica a individualidade dessa característica.

Alguns métodos empregados na determinação da TBi mostraram-se eficazes como os utilizados por Medeiros et al. (2002), Pedro Jr. et al (1990) e Tonato (2003). Entretanto, como o período de inverno na maioria das regiões tropicais é caracterizado por dias relativamente quentes e noites frias, são necessários estudos que verifiquem o efeito dessas oscilações em ambientes controlados e determinem a TBi de capins tropicais cultivados nessas condições.

2.2.4 Modelos preditores de respostas das culturas aos fatores climáticos

Modelos baseados em tempo cronológico são geralmente inadequados para a estimativa da produção de culturas forrageiras, uma vez que essas espécies não respondem da mesma maneira a essa variável (tempo) nas estações do ano e na mesma estação em localidades diferentes. Segundo Klepper et al. (1982), o intervalo entre o aparecimento de duas folhas só pode ser expresso em tempo cronológico em trabalhos em casa de vegetação, onde o ambiente é constante. Assim, equações que estimam a produção em função de idade da planta em dias (Gonçalves et al., 2001) são válidas

exclusivamente para aquela situação e época do ano específica em que foram determinadas.

A modelagem tem sido uma ferramenta importante na tentativa de integrar e explicar a os fatores climáticos envolvidos na estacionalidade da produção das culturas. Há evidências de que a máxima produção de massa seca não ocorre nos meses de maior temperatura do ar (Pedreira & Mattos, 1981), mesmo sob irrigação (Ghelfi Filho, 1972), reforçando a noção de que outros fatores, complementares à temperatura, atuam na determinação da produção e, por isso, modelos de produção baseados unicamente em soma térmica são provavelmente inadequados para a estimativa da produção forrageira, já que as variações estacionais da produção são muito maiores que as variações de soma térmica.

Com o objetivo de integrar os efeitos da temperatura do ar e do fotoperíodo sobre a resposta das culturas, Villa Nova et al. (1983) propuseram a unidade fototérmica (UF), índice climático que combina temperatura do ar e fotoperíodo, para previsão da produtividade das culturas em resposta às variações estacionais de variáveis climáticas. Villa Nova et al. (1999), usando os dados obtidos por Ghelfi Filho (1972) para o capim napier (*Pennisetum purpureum* Schum.) irrigado e os dados climáticos referentes ao período estudado, relacionaram produção de matéria seca e unidade fototérmica. O modelo utilizado conseguiu explicar a variação encontrada no trabalho ($R^2 = 0,97$), levando à conclusão de que seria viável o uso da unidade fototérmica para a estimativa da produção total de forragem e de sua variação estacional para pastagens de capim elefante em condições irrigadas ou na ausência de deficiência hídrica (regiões com precipitação em quantidades satisfatórias e bem distribuída ao longo do ano). Moreno et al. (2000), utilizando dados da produção de forragem de grama estrela cv. Florico (*Cynodon nlemfuënsis* Vanderyst var. nlemfuënsis) em Piracicaba, obtiveram um bom ajuste entre a produção medida e a estimada pelo modelo ($R^2 = 0,99$), o mesmo encontrado por Medeiros et al. (2001) para capins do gênero *Cynodon* em Jaboticabal e Piracicaba, estado de São Paulo.

É visível o crescente interesse do setor produtivo na possibilidade de produção de forragem (tanto para corte como para pastejo) sob irrigação, porém estudos de

viabilidade técnica e econômica devem estar baseados nas respostas biológicas das plantas bem como na localização geográfica da operação. A eliminação da estacionalidade da produção de forragem é provavelmente impossível, pois é função de fatores passíveis de um certo grau de controle (como disponibilidade hídrica) juntamente com fatores não controláveis (como fotoperíodo e temperatura do ar). Assim, uma boa razão para o uso da irrigação estaria em eliminar uma das variáveis causadoras da estacionalidade no período seco e maximizar o aproveitamento das condições ótimas do período quente e chuvoso (evitando-se os veranicos) na tentativa de fazer com que as variações estacionais sejam regulares ao longo dos anos, tornando-as previsíveis e conseqüentemente menos problemáticas.

2.3 Características estruturais do dossel e seu impacto sobre o uso da radiação incidente

Vários são os aspectos morfológicos envolvidos na interceptação de luz em comunidades de plantas. Uns correspondem a aspectos relacionados com a organização espacial das folhas (densidade de cobertura foliar, distribuição horizontal e vertical das folhas e ângulo foliar). Outros correspondem àqueles relacionados com aspectos funcionais que dependem de fatores da planta e do ambiente como idade, tipo e tamanho das folhas, saturação luminosa, flutuações na intensidade e na quantidade da luz (Bernardes, 1987). Variações na morfologia das plantas afetam outros fatores ligados à produção, além da distribuição de luz no dossel e da fotossíntese. A circulação de ar afeta os processos de transferência de CO₂ e a evapotranspiração e são fortemente dependentes do microclima do dossel devido à sua arquitetura (Loomis & Williams, 1969).

2.3.1 Índice de área foliar (IAF)

O conceito de IAF, definido por Watson (1947) como sendo a razão entre a área de folhas e a área de solo ocupada pela cultura, é o principal determinante da

interceptação e utilização da radiação solar pelas plantas. Esse conceito passou a ter grande importância em estudos sobre crescimento e manejo de pastagens, pois contempla aspectos físicos e fisiológicos da comunidade de plantas (Brown & Blaser, 1968). A distribuição do IAF ao longo do dossel pode explicar, ao menos parcialmente, as eventuais diferenças em produção, além de definir a necessidade de diferentes regimes de desfolha devido às diferenças morfológicas entre plantas (Rhodes, 1971). O IAF no qual o dossel atinge máxima taxa de acúmulo é chamado de IAF ótimo (Murtagh & Gross, 1966); o IAF crítico é aquele no qual 95% da radiação incidente é interceptada (Rhodes, 1973) e, embora sejam muito próximos, não são necessariamente coincidentes (Brown & Blaser, 1968).

Apesar das máximas taxas de acúmulo serem atingidas quando a colheita da forragem é realizada na condição de IAF ótimo, Brown & Blaser (1968) alertaram que como os objetivos do manejo são permitir elevadas produções ao longo do ano e manter a perenidade do sistema (principalmente em sistemas – como o de lotação rotacionada – em que a área foliar residual é pequena e composta por folhas fotossinteticamente pouco eficientes), pode ser necessário postergar a desfolha com o intuito de permitir à planta maior acúmulo de reservas, posteriormente utilizadas na rebrotação seguinte. Por outro lado, Murtagh & Gross (1966) observaram maior heterogeneidade em dosséis de *Festuca arundinacea* (Schreb.) e arroz (*Oryza sativa* L.) que desenvolveram IAFs maiores que o ótimo.

Devido à sua relevância para os processos de crescimento das plantas, aspectos de manejo devem idealmente levar o IAF em consideração, juntamente com a interceptação luminosa do dossel (Brown & Blaser, 1968; Korte et al., 1981; Uebele, 2002), principalmente pela boa correlação entre IAF e altura do dossel, e pelo fato de que a altura é uma variável facilmente medida no campo. Dessa forma, condições de meio e, eventualmente de manejo, que causem variações na velocidade de crescimento da planta, atuarão de maneira análoga sobre IAF (e, conseqüentemente, sobre interceptação luminosa e altura do dossel), enquanto que práticas de manejo baseadas apenas em um período de rebrotação fixo dentro de uma estação não conseguem contemplar tais variações.

2.3.2 Ângulos foliares

Ângulos foliares também são componentes da caracterização morfológica do dossel pois não afetam somente a iluminação relativa de uma folha totalmente exposta, mas a sombra projetada e o fluxo de radiação disponível às folhas inferiores (Loomis & Williams, 1969), afetando assim a extensão de penetração da luz no dossel (Pedreira et al., 2001). Rhodes (1973) já apontou vantagens de métodos de manejo que maximizam produção em comunidades de plantas eretas, capazes de permitir distribuição relativamente uniforme da luz ao longo do dossel. Distribuição uniforme da luz também ocorre quando a radiação é predominantemente difusa o que aumenta a eficiência de uso da radiação pela comunidade de plantas (Norman & Arkebauer, 1991).

A inter-relação entre ângulos foliares, IAF, interceptação luminosa e taxas de fotossíntese, é, em última análise, o determinante de produção potencial de um estande de plantas e IAF e ângulos foliares devem ser considerados conjuntamente em qualquer referência de seu efeito sobre eficiência fotossintética (Loomis & Williams, 1969; Duncan, 1971). A equação $I = [I_0 e^{(-k L)}]$ descreve o efeito conjugado do IAF e dos ângulos foliares sobre a interceptação luminosa, sendo I a radiação em um ponto no dossel, com IAF igual a L, I_0 a radiação no topo do dossel e k o coeficiente de extinção luminosa, cujas variações estão associadas principalmente às variações dos ângulos foliares (Warren Wilson, 1960; Brown & Blaser, 1968; Loomis & Williams, 1969; Hay & Walker, 1989). Menores valores de k indicam um arranjo de folhas mais ereto ao passo que arranjos planófilos resultam em maiores valores de k (Warren Wilson, 1960).

Pearce et al. (1967) e Duncan (1971) relataram que para IAFs mais elevados a eficiência fotossintética aumenta com folhas mais eretas. Com menores valores de IAF, as diferenças na eficiência fotossintética entre ângulos foliares são pequenas, mas conforme o IAF aumenta, essas diferenças passam a ser mais relevantes (Pearce et al., 1967; Duncan, 1971).

Duncan (1971) relatou também que em diferentes latitudes ocorrem diferenças “pequenas porém consistentes” na relação entre ângulos foliares e taxas de fotossíntese – em latitudes menores as diferenças entre os arranjos para máxima e mínima taxa de

fotossíntese foram maiores, sugerindo que nos trópicos a importância de ângulos foliares seja maior que em latitudes maiores. Tal sugestão é suportada pelos resultados de Pearce et al. (1967) que encontraram maiores diferenças na eficiência fotossintética de dosséis com diferentes ângulos foliares quando a intensidade luminosa foi maior.

2.3.3 Altura

A facilidade da medição de altura do dossel faz com que esta seja uma ferramenta potencial no manejo do pastejo. Canto et al. (2001) e Mello (2001) observaram resposta linear positiva da massa de forragem do capim Tanzânia à altura do dossel. Mello & Pedreira (2004), trabalhando com capim Tanzânia e Carnevalli (2003), de forma similar para o capim Mombaça, encontraram incrementos decrescentes da interceptação luminosa em função da altura do dossel, até atingir uma assíntota quando o dossel interceptava aproximadamente 95% da luz incidente.

A altura do dossel está, segundo Hodgson (1990), entre as características que mais afetam a produtividade de animais em pastejo (devido ao seu efeito sobre a profundidade do bocado e suas conseqüências sobre os demais componentes da dinâmica do pastejo) e da pastagem, já que a altura da pastagem também está intimamente relacionada ao IAF e à massa de forragem do dossel.

Segundo Warren Wilson (1960), se uma área de folhas considerável concentra-se em um pequeno estrato do dossel, a superposição de folhas, próximas umas das outras, resulta em auto-sombreamento, principalmente se as folhas forem grandes. A distribuição da mesma área foliar em uma altura maior (Warren Wilson, 1960) ou entre folhas menores (Loomis & Willians, 1969) resulta em maiores produções. Pearce et al. (1967) observaram que além dos ângulos foliares, a altura também afetava a distribuição da luz no dossel e o efeito de cada um é difícil de ser isolado.

A maior importância da altura, no entanto, é a competição por luz, uma vez que, em estandes mistos, plantas mais altas podem interceptar quase toda a radiação e limitar o crescimento de plantas mais baixas (Warren Wilson, 1969). Apesar da vantagem competitiva, plantas mais altas podem ter sua taxa de crescimento reduzida,

quando em estandes homogêneos, devido à menor proporção de órgãos assimilatórios em relação aos de órgão de suporte (Warren Wilson, 1969).

2.4 A fotossíntese foliar e de dossel como determinantes fisiológicas da produção de forragem

Temperatura, fotoperíodo, radiação solar, umidade do solo e disponibilidade de nutrientes afetam diretamente a produção de massa seca e também o processo fotossintético (Cooper & Tainton, 1968; Marshal, 1980; Hay, 1990) que, segundo Bernardes (1987), é o principal determinante da produtividade agrícola das plantas. Cerca de 90 a 95% da forragem colhida é composta por carbono proveniente da assimilação de CO₂ (Nelson, et al., 1975), embora a fotossíntese seja um processo ineficiente, em que apenas 2 a 5 % da energia luminosa que chega à superfície do relvado é convertida em energia química (Bernardes, 1987). O processo fotossintético, por sua vez, depende da eficiência de interceptação luminosa do dossel, determinada pelo IAF, ângulos foliares, relação haste/folha, idade das folhas, tipo e tamanho da folha, flutuação na densidade e qualidade da luz e saturação luminosa ao longo do seu desenvolvimento. Morgan & Brown (1983) obtiveram relação linear entre a taxa de fotossíntese de dossel e a interceptação de radiação fotossinteticamente ativa e quadrática com o IAF de *Cynodon dactylon* (L.) Pers., atingindo um ponto máximo com IAF correspondente à interceptação luminosa próxima a 95%.

Cooper & Wilson (1970) postularam que a eficiência do dossel na conversão da energia luminosa em matéria seca é dependente das taxas de fotossíntese de folhas individuais, dos padrões de interceptação luminosa do dossel e da distribuição da matéria seca na planta ao longo do perfil do dossel, embora a utilização da energia solar possa ser limitada por outros fatores como temperatura inadequada, déficit hídrico e/ou déficit nutricional (Da Silva & Pedreira, 1997).

Folhas individuais apresentam grande variação em sua capacidade fotossintética, que é determinada por vários fatores como a quantidade de radiação solar incidente, temperatura, suprimento de água e, principalmente, o estágio de desenvolvimento da

folha (Zelitch, 1982; Pedreira et al., 2001) o que faz com que a variação de tais fatores dentro do dossel resulte em taxas de fotossíntese foliar que não representam as taxas do dossel. Nelson et al. (1975) não encontraram relação entre taxa de fotossíntese foliar e produção de forragem em *Festuca arundinacea* (L.), uma vez que avaliações de taxas fotossintéticas foliares medidas em curtos períodos de tempo dificilmente explicam as variações em produção, pois não exprimem a total assimilação de CO₂ pela comunidade de plantas seja ao longo de um dia ou de uma estação (Zelitch, 1982).

Mello et al. (2001) mediram diferentes taxas de fotossíntese líquida em folhas individuais de capim Tanzânia em resposta às variações de temperatura e densidade de fluxo de radiação, sendo as maiores taxas obtidas a 35 °C seguido de redução a 40 °C, provavelmente devido ao estresse térmico. Ao longo do perfil vertical de um dossel, as variações de temperatura e luminosidade são grandes, além da diferença na idade fisiológica das folhas, o que lhes confere diferentes potenciais fotossintéticos. Braga et al. (2002) encontraram diferentes taxas de fotossíntese para folhas em diferentes níveis de inserção no eixo de perfilhos de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, sendo a folha mais jovem completamente expandida a que apresentou maiores taxas fotossintéticas, estando de acordo com Norman & Arkebauer (1991). Acock (1991) ressaltou a ocorrência de diminuição na condutância estomática e na respiração de folhas localizadas mais abaixo em relação à superfície do dossel. Braga et al. (2002), registraram redução no ponto de compensação luminosa, passando de 36 para 10 μmol fótons $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e na respiração, passando de 3,0 para 1,0 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, nas folhas mais jovem ainda em expansão e mais velha, respectivamente.

Apesar da grande variação na capacidade fotossintética entre as categorias de folhas, existe a possibilidade de elevadas produções na ausência de elevadas taxas de fotossíntese foliar devido ao rápido desenvolvimento da área foliar e/ou reduzidas perdas respiratórias (Zelitch, 1982). Nelson et al. (1975), no entanto, consideraram a fotossíntese foliar como o fator primário da produtividade das culturas e Sinclair (1991) descreveu a eficiência do uso da radiação como sendo fortemente dependente da máxima taxa de fotossíntese foliar. Reduções nessas taxas devido a sombreamento, senescência ou estresses causados por pragas, doenças e deficiência hídrica ou

nutricional diminuem a eficiência de uso da radiação. Isso é relevante quando se leva em conta que com o aumento do IAF ocorre um aumento do auto-sombreamento no dossel, o que causa prejuízos muito maiores às taxas de fotossíntese foliar do que o envelhecimento das folhas (Acock, 1991). A eficiência do uso da água também depende de características ligadas à folha como concentração interna de CO_2 (C_i) e peso foliar específico (g de folha/m² de folha) (Gutschick, 1991).

Além da fixação de carbono outros processos estão envolvidos na formação da produção. Além das fontes de carbono (órgãos fotossintetizantes), o processo produtivo depende da translocação de fotoassimilados para os drenos metabólicos (grãos, tubérculos, etc.) uma vez que o acúmulo de carboidratos nas folhas pode reduzir a fotossíntese líquida (Zelitch, 1982). A partição de fotoassimilados assume grande importância em plantas forrageiras devido à constante remoção das fontes de carbono (folhas) e ao fato de que o suprimento de energia aos tecidos meristemáticos é fundamental para a regeneração das partes removidas por corte ou pastejo (Pedreira, 1992).

A demanda pelos carboidratos produzidos (força-dreno) deve ser proporcional à capacidade fotossintética da planta e, portanto, ganhos em produtividade substanciais baseados em características de assimilação de CO_2 só serão obtidos se a demanda pelos carboidratos produzidos tiver um aumento proporcional (Zelitch, 1982).

Outro processo importante é a respiração. Hay & Walker (1989) descreveram o trabalho de Duncan et al.¹ em que um modelo para a simulação da fotossíntese de uma comunidade de plantas foi desenvolvido. Quando foi utilizada apenas uma curva de fotossíntese/respiração em resposta à luz para converter radiação absorvida em produção, o modelo subestimava as taxas de crescimento para IAFs maiores que 3 pois o modelo não levava em consideração que folhas sombreadas, além de menores taxas de fotossíntese, apresentam menores taxas respiratórias. Robson (1982) encontrou vantagens produtivas de linhagens de azevém (*Lolium perenne* L.) com menores taxas respiratórias (por unidade de massa seca), devido ao menor custo respiratório e ao maior número de perfilhos, resultante do abundante suprimento de fotoassimilados nessas plantas.

¹ DUNCAN, W.G., LOOMIS, R.S., WILLIAMS, W.A. et al. A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*, v. 38, p.181-205, 1967.

2.5 Modelagem como ferramenta para o estudo e o planejamento da produção

A integração de fatores determinantes da produtividade das plantas com fatores do meio e suas variações estacionais permite entender e explicar a estacionalidade da produção das plantas forrageiras. A modelagem matemática constitui-se numa descrição simplificada de sistemas reais a partir da integração de conhecimentos de diferentes disciplinas com o intuito de sintetizar, apresentar e analisar diversos aspectos da produção agrícola, incluindo a produção e os diversos tipos de interações entre as culturas e o meio ambiente e permitindo a previsão do comportamento da comunidade de plantas (Bernardes, 2000), além de permitir a identificação de oportunidades para a melhora no manejo utilizado (Woodward, 1998).

Algumas das principais dificuldades do processo de modelagem estão no tratamento estatístico a ser utilizado, o que leva muitos pesquisadores a recorrer a simplificações. As limitações computacionais existentes até poucos anos atrás faziam com que modelos com significado biológico e análises estatísticas precisas fossem conflitantes, levando à preferência por modelos lineares e/ou polinomiais (que geram bons resultados estatísticos) em relação àqueles não-lineares, com maior significado biológico (Cacho, 1993). Entretanto, os avanços computacionais na área estatística já permitem o uso de modelos não-lineares na modelagem de fenômenos biológicos e, além disso, o correto emprego de análises de medidas repetidas no tempo (Peek et al., 2002), .

Modelos empíricos, geralmente equações de regressão envolvendo variáveis climáticas, fornecem boas estimativas de produção mas são restritos às condições de meio e ao cultivar com os quais foram gerados. Por outro lado, modelos mecanísticos têm como objetivo explicar o crescimento a partir das respostas integradas de processos básicos, como a assimilação de CO_2 e respiração, a fatores ambientais (Goudriaan e Van Laar, 1994).

Diversos modelos que simulam a produção de plantas estão disponíveis atualmente, além de sub-modelos que simulam processos determinantes da produção

vegetal. A equação de Monsi e Saeki, descrevendo a atenuação da luz no dossel em relação à sua quantidade de folhas (IAF) e a capacidade delas de interceptar a radiação, tornou possível a estimativa da fotossíntese de dossel, uma etapa fundamental para o desenvolvimento de modelos completos que descrevem o crescimento e a produção das culturas (Hay & Walker, 1989). O modelo de Boote & Jones (1987), através da integração alguns dos fatores determinantes da assimilação de carbono pelas plantas tais como IAF, coeficiente de extinção luminosa, densidade de fluxo da radiação e máxima taxa de fotossíntese foliar, é capaz de estimar a fotossíntese do dossel e sua resposta à radiação (Johnson et al., 1989).

O modelo SUCROS 1 simula a produção potencial (acúmulo de massa seca) de culturas, sob amplo suprimento de água e nutrientes e livre da interferência de pragas e doenças, a partir da assimilação de CO₂ pelo dossel (fotossíntese) e utilização do carbono pelas plantas para manutenção e crescimento. A fotossíntese é estimada a partir de características do dossel como IAF, quantidade de energia radiante absorvida e fotossíntese de folhas individuais e a utilização do carbono absorvido é estimada por coeficientes de alocação, dependentes do estágio fenológico da planta (Goudriaan & Van Laar, 1994).

Alguns dos modelos disponíveis são específicos para algumas culturas, como é o caso do GOSSYM, para a cultura do algodão (Hodges et al., 1998). O modelo é composto de sub-rotinas descrevendo os processos no solo, como aqueles envolvendo a água, fertilizantes e características físicas do solo, processos na planta em resposta a fatores do meio ambiente (principalmente temperatura e radiação), como absorção e partição do carbono e fenologia, e a ação de produtos reguladores de crescimento. As limitações impostas para o crescimento potencial devido à disponibilidade de água ou nutrientes e as possíveis vantagens provenientes da utilização de reguladores de crescimento são calculadas a partir da integração dessas sub-rotinas, permitindo a simulação de diversos cenários no apoio à tomada de decisões de manejo. De maneira similar, o modelo CROPGRO, para as culturas de soja, amendoim e feijão, utiliza sub-rotinas envolvendo o balanço de carbono na planta, balanço de nitrogênio no solo e na planta e balanço hídrico no solo (Boote et al., 1998) e o modelo AFRC WHEAT para a

cultura do trigo, que utiliza as sub-rotinas desenvolvimento fenológico, produção de folhas e perfilhos (desenvolvimento do dossel), produção de raízes, interceptação luminosa e fotossíntese (produção de massa seca) e partição do carbono (Hay & Walker, 1989).

Modelos que descrevem a produção animal em pastagens são muito complexos pois além de necessitarem dos mesmos sub-modelos necessários para a modelagem de culturas agrícolas, envolvendo as relações entre a planta e o meio, necessitam de sub-modelos que descrevam os processos fisiológicos do animal em pastejo e a interação do animal com a pastagem que lhe é oferecida (Loewer Jr., 1998; Woodward, 1998), como no modelo GRAZE (Loewer Jr, 1998). Devido à complexidade das interações envolvidas no processo produtivo, o desenvolvimento de modelos é um processo lento e depende do envolvimento de equipes multidisciplinares e, portanto, bancos de dados amplos e completos, de todas as áreas e disciplinas envolvidas, são fundamentais para que modelos realísticos possam ser desenvolvidos.

Assim, a modelagem da produção de forragem em função da unidade fototérmica associada à análise de componentes morfofisiológicos das plantas forrageiras é apenas um de uma série de estudos necessários para que se tenha um modelo que auxilie no planejamento e na tomada de decisões em sistemas de produção animal baseados na exploração de pastagens.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento, dados climáticos, delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido em uma área experimental pertencente ao Departamento de Zootecnia da USP/ESALQ, localizada no município de Piracicaba a 580 m de altitude, 22°42'30" S de latitude e longitude 47°30' W. O experimento teve início em 20 de dezembro de 2002 e término em 08 de abril de 2004. O clima do local é descrito como Cwa pela classificação de Köppen (Figura 1).

Os dados climáticos referentes ao período experimental (Figura 1) foram obtidos no posto meteorológico do Departamento de Ciências exatas da ESALQ, distante 1 km da área experimental.

Figura 1 - Médias mensais de temperaturas máximas, médias e mínimas ocorridas durante todo o período experimental, comparadas com dados médios de 1917 a 2003

Foram estudados quatro cultivares de *P. maximum*: Tanzânia, Mombaça, Tobiata e Atlas (material não lançado) e um híbrido natural de *P. maximum* e *P. infestum*, o cultivar Massai, em um delineamento experimental de blocos completos casualizados, com 5 tratamentos correspondendo aos 5 cultivares e 4 repetições, totalizando 20 unidades experimentais (parcelas), cada uma medindo 10×4 m, e separadas por corredores de aproximadamente 0,8 m de largura (Figura 2).

O solo da área experimental é classificado como Nitossolo Vermelho eutroférico, com horizonte A moderado e de textura argilosa/muito argilosa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999), sem necessidade de calagem ou fertilização corretiva, além da adubação de produção (Tabela 2).

Figura 2 - Vista geral da área experimental

Tabela 2. Análise de solo da área experimental

pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	T	V%
CaCl ₂									
	g/dm ³	mg/dm ³	-----mmol _c /dm ³ -----						
5,5	32	70	2,2	56	25	22	82,6	105,1	79

3.2 Manejo de cortes, da adubação e da irrigação

Com o início do experimento a forragem das parcelas passou a ser cortada periodicamente com roçadeira motorizada costal a cada 28 dias no verão e 49 dias no inverno para Massai, Mombaça e Atlas, e a cada 35 dias no verão e 63 dias no inverno para Tanzânia e Tobiata, deixando-se um resíduo de aproximadamente 35 cm para o Atlas, Mombaça, Tanzânia e Tobiata ou 15 cm para o Massai.

A escolha de frequência de cortes foi feita com base em algumas características inerentes aos cultivares. O cultivar Massai tem ciclo de florescimento precoce (Jank¹) e floresce o ano todo (Savidan et al., 1990) e de forma similar, o cultivar Atlas possui ciclo de florescimento médio (Usberti Filho¹) devendo ambos ser manejados com cortes mais frequentes. O cultivar Tanzânia tem como características abundância de folhas e menor porte (Jank, 1995) permitindo cortes a uma frequência menor. A maioria dos trabalhos descritos na literatura reporta 35 dias de intervalo de desfolhas para o capim Tanzânia (Tosi, 1999; Pedreira & Rosseto, 2000 e Penati, 2002). O cultivar Mombaça, com maior porte e maior crescimento de hastes (Jank, 1995) apresentou melhores resultados quando foi desfolhado com maior frequência (28 dias no verão – Braga, 2001). Para o cultivar Tobiatã os dados são mais escassos sendo que Teixeira (1998) utilizou intervalo entre desfolhações de 35 dias.

Foram realizadas adubações de produção correspondendo a 250 kg/ha de N e K₂O utilizando-se a fórmula 20-00-20 durante o verão agrostológico (outubro a março), com o intuito de evitar que houvesse limitação ao crescimento das plantas devido à falta de nutrientes (principalmente N e K), as adubações continuaram ao longo do período seco do ano, totalizando 400 kg ha⁻¹ano⁻¹ de N e K₂O para os cultivares Tanzânia e Tobiatã e 485 kg ha⁻¹ano⁻¹ de N e K₂O para os cultivares Atlas, Massai e Mombaça. As adubações foram realizadas manualmente imediatamente após cada corte. A diferença no total anual de nitrogênio aplicado entre os cultivares Tanzânia e Tobiatã e Atlas, Massai e Mombaça se deve às diferentes frequências adotadas, proporcionando aos cultivares Atlas, Massai e Mombaça dois cortes a mais durante o período seco do ano (abril a setembro).

Para que a água não fosse um fator limitante do crescimento e dessa forma as plantas pudessem desenvolver seu potencial produtivo, respondendo apenas às variáveis climáticas e assim permitindo a modelagem de tais respostas, a área experimental foi irrigada durante todo o período experimental. O manejo da irrigação foi baseado no monitoramento das condições hídricas do solo através de dois tensiômetros instalados na área experimental a 20 cm de profundidade. Sempre que os tensiômetros registravam valores de potencial hídrico no solo entre 0,30 e 0,40 kPa procedia-se a irrigação. A

¹ Comunicação pessoal

irrigação também era realizada após cada adubação (sempre após os cortes), com o intuito de maximizar a eficiência do adubo aplicado. O balanço hídrico mensal do período do experimento confirma a ausência de déficit hídrico (Tabela 3).

Tabela 3. Balanço hídrico mensal do período experimental

Mês	Precipitação	Irrigação	Evaporação ¹	Saldo ²	Balanço ³
	-----mm-----				
jan/03	302,4	0,0	167,05	135,35	100,00
fev/03	58,6	14,6	162,85	-89,60	10,35
mar/03	180,9	29,2	148,29	61,81	72,16
abr/03	55,2	25,7	118,90	-38,00	34,16
mai/03	54,7	18,5	99,24	-26,04	8,12
jun/03	9,2	84,0	93,66	-0,41	7,71
jul/03	16,4	87,6	112,19	-8,19	-0,48
ago/03	17,8	114,0	117,17	14,63	14,15
set/03	12,1	135,0	160,84	-13,69	0,46
out/03	89,2	102,3	179,33	12,22	12,68
nov/03	168,0	40,1	167,23	40,92	53,60
dez/03	139,9	14,6	187,99	-33,49	20,11
jan/04	196,4	43,8	153,46	86,74	100,00
fev/04	194,0	0,0	171,97	22,03	100,00
mar/04	79,1	7,4	175,21	-88,71	11,29

¹ evaporação de referência (tanque classe “A”)

² saldo mensal [(precipitação + irrigação) – evaporação]

³ quantidade de água disponível, considerando-se a capacidade de água disponível do solo (CAD) de 100 mm (1,3 mm cm⁻¹ e 80 cm de profundidade do sistema radicular)

3.3 Massa e Acúmulo de forragem

Nas respectivas datas de colheita de cada parcela, quantificou-se a massa de forragem cortando-se, com um aparador de cerca-viva, a forragem do interior de três molduras de 1 m² cada (0,5 × 2,0 m) à altura do resíduo (35 cm ou 15 cm). A forragem contida em cada quadrado foi pesada fresca no campo e dela retirada uma sub-amostra de aproximadamente 600 g, acondicionada em sacos de pano, pesada fresca, e em seguida seca a 65° C até peso constante. A amostra seca era pesada novamente para a determinação do teor de matéria seca da sub-amostra, a fim de converter o peso verde da amostra em peso seco.

Como os cortes de amostragem eram sempre feitos a resíduos constantes, massa e acúmulo de forragem eram coincidentes, ou seja, o acúmulo de forragem em um ciclo de crescimento era a massa de forragem cortada (média de três quadrados), já que os resíduos do corte anterior e do subsequente foram os mesmos. Para o cálculo da produção anual de forragem foram utilizados os dados do período de 8 de abril de 2003 a 8 de abril de 2004 para os cultivares Tanzânia e Tobiata e de 18 de março de 2003 a 25 de março de 2004 para os cultivares Atlas, Massai e Mombaça. As taxas médias de acúmulo de forragem foram calculadas para cada ciclo dividindo-se o acúmulo de forragem acumulada pelo número de dias do período de rebrotação (kg MS ha⁻¹dia⁻¹). Estabeleceu-se como ‘verão’ o período de 21 setembro a 22 de março, que corresponde ao período de melhores condições para o crescimento da forragem (primavera e verão) e ‘inverno’ o período de 23 de março a 20 de setembro.

3.4 Cálculo da unidade fototérmica (UF)

O número de Unidades fototérmicas acumuladas em cada ciclo de crescimento foi calculado através das equações, descritas por Villa Nova et al. (1983):

$$UF = \frac{\left(\frac{n \overline{GD}}{2}\right)^{\frac{Nf}{Ni}+1}}{\frac{Nf}{Ni}+1} \quad (1)$$

em que, UF é o número de unidades fototérmicas correspondentes ao período de n dias de desenvolvimento após a desfolha; $\overline{GD}$ o número de graus-dia médio do período do período de n dias; Nf o valor do fotoperíodo (horas e décimos) no final do período de crescimento e Ni o valor do fotoperíodo no início do período de crescimento.

O valor de $\overline{GD}$ foi calculado pelas equações:

$\overline{GD} = (\overline{T} - T_{Bi}) - C$ (2) (usada quando $\overline{Tm}$ for maior que a temperatura base inferior)

$\overline{GD} = [(\overline{T_x} - T_{Bi})^2 / 2(\overline{T_x} - \overline{Tm})] - C$ (3) (usada quando $\overline{Tm}$ for menor que a temperatura base inferior)

sendo, $\overline{GD}$ o número de graus-dia médio do período de n dias; $\overline{T_x}$ a média das temperaturas máximas do ar do período; $\overline{Tm}$ a média das temperaturas mínimas do ar do período; $\overline{T}$ a temperatura média do ar do período, calculada pela média de $\overline{T_x}$ e $\overline{Tm}$, T_{Bi} a temperatura base inferior e C a correção de temperatura base superior (usada somente se $\overline{T}$ for maior que 30 °C), dada por:

$$C = \frac{(\overline{T_x} - 30)^2}{2(\overline{T_x} - \overline{Tm})} \quad (4)$$

Os valores de N (Nf ou Ni) para qualquer dia do ano foram obtidos pelas equações:

$$N = 0,1333 \arccos(-tg \delta \cdot tg \phi) \quad (5)$$

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (DJ - 80) \right] \quad (6)$$

sendo N o fotoperíodo (horas e décimos); ϕ = latitude do local (graus e décimos; negativa Sul, positiva Norte); δ a declinação solar (graus e décimos) e DJ o dia Juliano (n^o de ordem a partir de 1 de Janeiro).

As TBi foram obtidas através de regressão linear simples, relacionando a taxa média de acúmulo de cada rebrotação e a temperatura média do período. Resolvendo-se a equação $y = ax + b$ para $y = 0$, tem-se a temperatura média em que a taxa média de acúmulo é nula e, assumindo-se esta como a temperatura base inferior (Pedro Jr. et al., 1990).

A quantidade de Unidades fototérmicas acumulada ao longo das rebrotações acompanhadas e durante o ano, foi utilizada para substituir “dias” nos modelos não-lineares para produção de forragem e respostas morfofisiológicas.

3.5 Composição do Modelo de produção de forragem

Para compor o modelo de produção de forragem baseado na Unidade Fototérmica foram acompanhadas semanalmente duas rebrotações dos capins ao longo do verão (janeiro a fevereiro de 2003 e de 2004) e uma a cada duas semanas ao longo do inverno (junho a agosto de 2003). Nessas ocasiões foi cortada a forragem contida no interior de dois quadrados de $0,5 \text{ m}^2$ ($0,5 \times 1,0 \text{ m}$) por parcela, com o auxílio de uma moldura metálica e um aparador de cerca-viva, separando-se a forragem do resíduo (cortada aproximadamente a 5 cm do solo e utilizada para estimativa da massa de forragem do resíduo) daquela acima da altura do resíduo. As amostras colhidas foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas a -20° C para posterior separação morfológica. A separação foi realizada em uma sub-amostra, correspondente a uma porção da amostra com pelo menos 1000 cm^2 de folhas (para o capim Massai esse valor foi de 500 cm^2 para que não houvesse ressecamento das folhas), e os componentes (folhas, hastes e material morto) e a porção não separada foram acondicionados em sacos de papel e colocados em estufa de secagem com circulação de ar forçada a 65° C até peso constante. A soma dos componentes separados e das amostras acima do resíduo resulta na massa de forragem acumulada em cada momento de amostragem, gerando a curva de acúmulo.

3.6 Índice de área foliar (IAF), interceptação luminosa (IL), ângulos foliares e fotossíntese de folhas individuais

Durante as rebrotações acompanhadas, foram avaliadas características morfofisiológicas das plantas na tentativa de explicar as variações estacionais da produção de forragem. Nas datas de coletas das amostras para composição do modelo de produção (semanalmente no verão e bi-semanalmente no inverno), índice de área foliar, ângulos foliares e IL foram medidos utilizando-se o avaliador de dossel LI-COR modelo LAI 2000 (LI-COR, Lincoln Nebraska, EUA), descrito por Welles & Norman (1991), que permite amostragens rápidas e não destrutivas. As leituras foram feitas em 12 pontos representativos da condição média do dossel em cada parcela em cada data de amostragem e, a cada três medições sob o dossel, era realizada uma acima do dossel. O IAF também foi medido diretamente com o integrador de área foliar modelo LI-3100 (LI-COR, Lincoln Nebraska, EUA), utilizando-se as folhas obtidas da separação morfológica das amostras para a composição do modelo de produção de forragem. Após a separação e determinação da área, as folhas eram secas e pesadas, o que permitiu o cálculo da área foliar específica das folhas (cm^2g^{-1} de folhas). A proporção de folhas obtida na porção separada da amostra era extrapolada para toda a amostra e a partir da massa total da amostra determinou-se a massa total de folhas. O produto da área foliar específica pela massa de folhas da amostra resulta na área de folhas de toda a amostra; como a área que continha a amostra era conhecida ($0,5 \text{ m}^2$ ou 5000 cm^2), a divisão da área foliar da amostra pela área de solo que a amostra ocupava permitiu o cálculo do IAF. Os valores de IAF provenientes das medições diretas foram utilizados para a estimativa da fotossíntese de dossel.

As taxas de fotossíntese líquida de folhas individuais foram medidas através da estimativa da assimilação de carbono pelas folhas, usando-se um sistema medidor de fotossíntese portátil modelo LI-6400 (LI-COR, Lincoln Nebraska, EUA). Foram medidas as taxas de 3 folhas em cada parcela, sendo escolhidas, em touceiras representativas da parcela, aquelas mais jovem e completamente expandidas, verdes, limpas e inteiras.

Foi utilizada uma fonte luminosa do tipo LED no interior da câmara e fixou-se um valor de 1700 μmol de ftons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, valor esse situado na região assintótica da curva de resposta da taxa de fotossíntese foliar à radiação incidente (Mello et al., 2001 e Braga et al., 2003).

3.7 Simulação da fotossíntese de dossel

As taxas de fotossíntese de dossel foram calculadas para os momentos correspondentes às avaliações nas rebrotações acompanhadas, utilizando-se os valores de IAF, k e fotossíntese de folhas individuais obtidas nessas avaliações.

Para estimativa da taxa de fotossíntese do dossel, foi utilizado o modelo de assimilação de CO_2 em folhas “de sol” e folhas “de sombra” desenvolvido por Boote & Jones (1987), que leva em consideração o coeficiente de extinção luminosa (k) e também a reflexão e a transmissão de luz pelo dossel. Assim, um IAF de sol foi calculado analiticamente a partir do IAF total e do k (equação 7) e um IAF de sombra calculado subtraindo-se do IAF total o IAF de sol (equação 8).

$$\text{IAF}_{\text{sol}} = (1/k)[1 - \exp(-k \cdot \text{IAF}_{\text{total}})] \quad (7)$$

$$\text{IAF}_{\text{somb}} = \text{IAF}_{\text{total}} - \text{IAF}_{\text{sol}} \quad (8)$$

A assimilação de CO_2 pelas folhas de sol foi calculada por uma curva de resposta exponencial negativa, onde a assíntota é dada pela fotossíntese máxima de folhas, a inclinação inicial pela eficiência de utilização de luz e a variável de entrada é a irradiância fotossinteticamente ativa absorvida ($k(1 - \sigma)\text{PAR}$), de acordo com a equação 9:

$$F_{\text{sol}} = F_{\text{max}} \{ 1 - \exp[-Q_e \cdot k(1 - \sigma)\text{PAR}/F_{\text{max}}] \} \quad (9)$$

onde: F_{max} = fotossíntese de folhas individuais (mg de $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$) medida no campo com o medidor portátil de fotossíntese LI-6400 (LI-COR); Q_e = eficiência de utilização de luz (mol de $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1} / \text{mol PAR}$); PAR = radiação fotossinteticamente ativa incidente ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$); σ = coeficiente de reflexão e transmissão. A PAR incidente para a fotossíntese de folhas sombreadas, considerando o mesmo k e a mesma eficiência no uso da luz refletida e transmitida por todas as folhas sombreadas, é dada pela equação 10:

$$PAR_{somb} = \sigma * PAR [1 - \exp(-k * IAF_{somb})] / IAF_{somb} \quad (10)$$

onde: PAR_{somb} = radiação fotossinteticamente ativa para folhas de sombra. Deste modo, a assimilação por folhas de sombra é calculada de maneira análoga à de folhas de sol:

$$F_{somb} = F_{max} [1 - \exp(-Q_e * PAR_{somb} / F_{max})] \quad (11)$$

onde: F_{somb} = assimilação de CO_2 por folhas de sombra. Por fim, a assimilação total do dossel é a soma de ambas as categorias de folhas (equação 12):

$$F_{dos} = F_{sol} * IAF_{sol} + F_{somb} * IAF_{somb} \quad (12)$$

onde: F_{dos} = assimilação total CO_2 pelo dossel.

As taxas de fotossíntese do dossel foram utilizadas na tentativa de explicar as variações nas taxas de crescimento da forragem ao longo das rebrotações e entre as rebrotações de verão e inverno.

Abaixo, os valores adotados para algumas constantes:

$PAR = 1700 \mu\text{mol de fotons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Mello et al., 2001 e Braga et al., 2003);

$k = -[\ln(I/I_0)]/IAF$ (Brown & Blaser, 1968), onde I/I_0 é a transmissão de luz no dossel e IAF o índice de área foliar medidos através do avaliador de dossel LAI-2000 (LI-COR);

$Q_e = 0,07 \text{ mol } CO_2 \text{ mol f\u00f3tons}^{-1}$ (Hay & Walker, 1989; Boote & Loomis, 1991 e BRAGA et al., 2003) e

$\sigma = 0,20$ (Boote & Loomis, 1991).

3.8 Altura do dossel

A altura do dossel foi medida antes de cada corte e ao longo das rebrotações acompanhadas para composição do modelo de produção de forragem, utilizando-se uma régua de madeira graduada de 2 m. Foram tomados dez pontos por parcela em cada avaliação, sendo a altura em cada ponto a medida resultante de uma visada no topo do dossel, no entorno da régua, sendo a média dos dez pontos correspondente à altura do dossel naquele momento.

Modelou-se as variações de altura em função da unidade fototérmica com o intuito de permitir o uso dessa característica como um guia de manejo, associado ao uso dos modelos.

3.9 Análise estatística

Dados de produção (AF), temperatura base (T_{Bi}) bem como parâmetros referentes à morfo-fisiologia foram submetidos à análise de variância utilizando-se o pacote estatístico SAS. Foi utilizado o procedimento MIXED do SAS, sendo tratamentos os efeitos fixos e bloco efeito aleatório (Littell et al., 1996). As características morfofisiológicas, como foram medidas ao longo do tempo, foram comparadas utilizando-se um modelo de medidas repetidas no tempo, modelando-se a variação na mesma unidade experimental (ao longo do tempo) a partir de uma matriz de covariância (Littell et al., 1996). As médias foram comparadas usando-se o comando 'PDIF' do 'LSMEANS', adotando-se um nível de significância de 5 %.

Foram realizadas análises de correlação entre variáveis climáticas e produtivas e entre variáveis morfofisiológicas e produtivas por meio do procedimento estatístico CORR, do "software" estatístico SAS (SAS Institute, 1989). Essas análises foram feitas com o objetivo de avaliar a associação entre acúmulo de forragem e variáveis climáticas e variáveis morfofisiológicas.

Os dados referentes aos crescimentos acompanhados (verão e inverno agrostológicos) foram utilizados para modelar as variações temporais dos parâmetros estudados ao longo da rebrotação em cada uma das estações, de acordo com os modelos de UF.

Os ajustes dos modelos não lineares foram feitos inicialmente usando-se o procedimento NLIN do SAS SAS (SAS Institute, 1989), utilizado para a estimativa dos parâmetros iniciais do modelo. Esses valores foram adicionados à programação do procedimento NLMIXED do SAS para a determinação dos modelos definitivos. Esse procedimento ajusta a interdependência dos erros por meio de uma estrutura de variância e covariância, já que os dados foram coletados em medidas repetidas no tempo e, além

disso, contempla o efeito aleatório de blocos, inserido na assíntota do modelo, pois é esse o parâmetro sujeito à maior variabilidade individual (Lindstrom & Bates, 1990). O valor inicial utilizado para a variável que calcula o efeito aleatório de ‘indivíduos’ foi a variância entre blocos.

Como a estimativa dos parâmetros pelo NLMIXED é realizada através da maximização da verossimilhança, não é possível o cálculo da soma de quadrados e a realização do teste F para a determinação do nível de significância dos modelos. Por se tratarem de modelos não lineares, o R^2 não tem nenhum significado (Ratkowsky, 1990) e, portanto não são apresentados nas tabelas com os parâmetros dos modelos.

O método da maximização da verossimilhança (V) utilizado na estimativa dos parâmetros permitiu que a razão de verossimilhança (RV) fosse utilizada na comparação de modelos ‘aninhados’ – modelos simples (i. e. os parâmetros das regressões são iguais entre tratamentos) com modelos mais complexos (com um maior número de parâmetros, já que estes são diferentes entre os tratamentos) (Bates & Watts, 1988). A razão de verossimilhança, que é dada pela fórmula $RV = -2 [\ln (V_s) - \ln (V_c)]$, sendo V_s a máxima verossimilhança do modelo mais simples (V da regressão de um conjunto de tratamentos) e V_c a máxima verossimilhança do modelo complexo (que corresponde à soma de V das regressões individuais) e apresenta distribuição de Qui-quadrado, com graus de liberdade igual à quantidade de parâmetros perdida do modelo complexo para o modelo simples (i. e. a diferença entre o número de parâmetros dos modelos complexo e simples) (National Institute of Standards and Technology, 2004).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Respostas produtivas

4.1.1 Acúmulo total de forragem

A produção anual de forragem foi bastante diferente entre cultivares ($P < 0,05$) (Tabela 4), embora os valores sejam coerentes com o reportado por Herling et al. (2000), que encontraram produções de verão de 7 a 24 Mg MS ha⁻¹ e de 0,8 a 7 Mg MS ha⁻¹ no inverno (Tabela 1).

Tabela 4. Acúmulo anual de forragem, e ao longo do verão e inverno agrostológicos

Cultivar	Acúmulo total	Acúmulo ‘verão’	Acúmulo ‘inverno’
	Mg MS ha ⁻¹ ano ⁻¹	Mg MS ha ⁻¹	Mg MS ha ⁻¹
Massai	29,0 (1,69) a	20,4 (1,22) a	8,6 (0,52) a
Tobiatã	21,0 (1,69) b	14,3 (1,22) b	6,8 (0,52) a
Tanzânia	20,5 (1,85) b	13,6 (1,33) bc	7,0 (0,56) a
Mombaça	19,7 (1,69) b	15,5 (1,22) a	4,1 (0,52) b
Atlas	12,0 (1,69) c	8,6 (1,22) c	3,3 (0,52) b
Média	20,0	15,9	4,6
CV (%)	31,7	29,8	45,3

Médias na mesma coluna seguidas da mesma letra não diferem entre si ($P \geq 0,05$).

Valores entre parênteses correspondem ao erro padrão da média

O capim Massai destacou-se, com produção maior que a reportada por Savidan et al. (1990) obtida durante a avaliação desse germoplasma de *Panicum*. A superioridade de 30% na produtividade do capim Mombaça em relação à do capim Tanzânia reportada por Savidan et al. (1990) e Santos et al. (1999) não foi observada no presente estudo, sendo de apenas 15% no período de ‘verão’ e no ‘inverno’ o capim Tanzânia foi superior (Tabela 4).

As diferenças entre as produções anuais dos cultivares não se mantiveram dentro das estações e, apesar das restrições de luz e temperatura no inverno, o acúmulo de forragem nesse período foi capaz de diluir ou acentuar algumas das diferenças observadas no período de verão, de modo análogo ao que foi observado por Tonato (2003) trabalhando com capins do gênero *Cynodon*.

Diferenças no desempenho dos capins podem estar associados ao manejo utilizado. A massa de forragem residual do capim Massai foi sempre menor ($P=0,0001$; com 15 cm de altura média do resíduo) que a dos demais, com de 33 cm de altura média (Tabela 5). Penati (2002) encontrou máximo acúmulo de forragem para o capim Tanzânia com resíduos médios entre 3 e 4 Mg MS ha⁻¹, com altura média de 35 e 45 cm. O aumento da massa residual ao longo do período experimental ($P<0,0001$; Tabela 5) também foi reportado por Teixeira et al. (1999), que mediu variação na massa de forragem residual do capim Tobiatã de 1,5 a 8 Mg MS ha⁻¹ ao longo do período experimental, com alturas variando de 58 a 140 cm de altura. Por outro lado, Carnevalli (2003) reportou pequena variação anual na massa do resíduo do capim Mombaça (em média 3500 kg MS ha⁻¹), trabalhando com resíduos de 30 e 50 cm e desfolhas aos 95 e 100% de IL. No entanto, nos tratamentos em que a desfolha foi postergada até que quase toda a radiação fosse interceptada, a altura residual aumentou ao longo do experimento, passando de 33 a 50 cm e de 50 a 60 cm para os resíduos estabelecidos de 30 e 50 cm respectivamente.

No presente estudo a altura residual nos cortes foi mantida constante e, entretanto, houve aumento da massa do resíduo ao longo do experimento, provavelmente devido aos cortes terem sido realizados quando o dossel já interceptava quase toda a radiação incidente, o que permitiu maior acúmulo do componente haste no resíduo.

Carnevalli (2003) registrou menor proporção de hastes no resíduo de dosséis desfolhados com 95% de IL (23,1%), passando para 32,8% quando a desfolha foi realizada com 100% de IL.

Tabela 5. Massa de forragem do resíduo nas rebrotações acompanhadas ao longo do período experimental

Cultivar	Verão 1	Inverno	Verão 2
	(kg MS ha ⁻¹)	(kg MS ha ⁻¹)	(kg MS ha ⁻¹)
Tanzânia	6000 (409,1) a	8100 (288,0) a	12000 (472,7) a
Mombaça	5600 (444,1) a	7800 (252,8) a	8500 (495,8) c
Tobiatã	5000 (380,7) ab	7700 (240,3) a	10000 (380,8) b
Atlas	4100 (444,1) b	7300 (252,8) a	9000 (379,8) bc
Massai	2700 (444,1) c	5100 (252,8) b	5500 (365,6) d
Média	4700 C	7200 B	9000 A

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e de mesma letra maiúscula nas linhas, não diferem entre si ($P \geq 0,05$).

Valores entre parênteses correspondem ao erro padrão da média

4.1.2 Estacionalidade de produção

Em média, os cultivares concentraram 70% da sua produção no verão e 30% no inverno (Figura 3), corroborando os dados de Uebele (2002) para o capim Mombaça, que observou 73% do acúmulo de forragem durante o período de primavera/verão (verão agrostológico). Tosi (1999), trabalhando com o capim Tanzânia mediu produção de forragem concentrada 80% no verão e 20% no inverno, aproximando-se do que ocorreu no presente estudo (Figura 1). Jank et al. (1994), avaliando o germoplasma de *Panicum*, relatou produções durante o período seco do ano variando de 3 a 21% da produção anual, semelhante ao reportado por Pedreira & Mattos (1981), estudando o crescimento estacional de 25 espécies de capins tropicais.

Sob irrigação, Ghelfi Filho (1972) reportou 76% da produção anual do capim Napier (*Pennisetum purpureum* Schum.) durante o verão e 24% durante o inverno; Alvim et al. (1986) mediram produções de inverno, de oito espécies de capim tropical sob irrigação, correspondendo de 8,5 a 42,5% da anual, embora apenas dois capins apresentaram produção no inverno menor que 20% da total.

Os resultados reforçam a resposta dos capins do gênero *Panicum* às variações estacionais de temperatura e fotoperíodo, estando de acordo com o reportado por Tonato (2003) para capins do gênero *Cynodon*.

Figura 3 - Distribuição estacional da produção anual de forragem de capins do gênero *Panicum* sob irrigação

4.2 Efeito dos fatores climáticos sobre as respostas produtivas

4.2.1 Temperatura base inferior (T_{Bi})

Faixas de valores de T_{Bi} entre 10 e 15 °C para plantas tropicais (Cooper & Tainton, 1968) são comumente citadas na literatura. Provavelmente devido à escassez de dados específicos, generalizações dessa natureza são geralmente aceitas. Em alguns casos valores pontuais para grupos de plantas, como 15 °C (McWilliam, 1978), 16 °C (Pedro Jr. et al., 1990) e 17 °C (Costa, 1984) para gramíneas tropicais, são citados e, com menor

freqüência, valores mais específicos como 10 ° C para o capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) (Jacques, 1994).

Para *Panicum virgatum* (L.), Sanderson & Wolf (1995) indicaram 10 °C como TBi, valor esse menor do que os encontrados no presente estudo, embora os valores obtidos estejam dentro da faixa de valores citada na literatura (Figura 4 e Tabela 6).

Tabela 6. Valores da Temperatura Base inferior (TBi), com base na temperatura média, para os cultivares de *Panicum maximum*

Cultivar	TBi
	° C
Mombaça	17,54 (0,26) a
Tobiatã	17,53 (0,26) a
Tanzânia	17,06 (0,30) ab
Atlas	16,22 (0,26) bc
Massai	15,61 (0,26) c

Médias na mesma coluna seguidas da mesma letra não diferem entre si ($P \geq 0,05$).

Valores entre parênteses correspondem ao erro padrão da média

Tonato (2003), trabalhando com capins do gênero *Cynodon* encontrou diferenças na temperatura base inferior de até 13% entre cultivares, o que também ocorreu no presente estudo. A extrapolação dos valores medidos para outras espécies (ou até cultivares de um mesma espécie) pode, portanto, levar a erros, uma vez que tal característica tem mostrado individualidade, até mesmo dentro de um mesmo gênero. As diferenças entre as TBis dos cultivares ajudam a explicar as diferenças encontradas na produção de forragem durante o inverno agrostológico (uma vez que a água não foi fator limitante da produção no presente estudo) e estão provavelmente associadas a diferenças nos ambientes de origem de cada material (Alcântara et al., 1989; Rodrigues et al., 1989).

Figura 4 – Regressões entre taxa média de acúmulo e temperatura média nos ciclos de rebrotação, para determinação da TBi em capins do gênero *Panicum*

A menor TBi do capim Massai pode ser um dos fatores responsáveis por sua maior produção, provavelmente por ter havido condições de crescimento favoráveis ao longo de todo o ano. O capim Atlas, por outro lado, com TBi semelhante à do Massai, foi o menos produtivo, o que pode ser indicativo de que o manejo adotado para este cultivar não tenha permitido a expressão de seu potencial produtivo. Os capins Mombaça, Tanzânia e Tobiata, com TBis semelhantes, apresentaram também produção anual semelhante.

4.2.2 Temperatura, fotoperíodo e produção de forragem

Foram determinados os coeficientes de correlação (r) entre as características acúmulo de forragem (AF) e taxa média de acúmulo (TMA) e as variáveis climáticas temperatura (máxima, média e mínima), fotoperíodo (N) médio do período de rebrotação, graus-dia (GD) e unidades fototérmicas (UF) acumulados em cada ciclo de crescimento (Tabela 7).

A ausência de correlação encontrada entre produção de forragem e unidades fototérmicas acumuladas durante as rebrotações ao longo do ano foi provavelmente devida ao aumento no intervalo entre desfolhas durante o inverno (49 dias para Atlas, Massai e Mombaça e 63 dias para Tobiata e Tanzânia, em todos os casos 80% de aumento em relação ao período de verão), o que diminuiu a amplitude de valores para a quantidade de unidades fototérmicas acumuladas nas rebrotações ao longo do ano. O mesmo ocorreu com o acúmulo de graus-dia, resultando em baixos coeficientes de correlação. Apesar disso, ao longo das rebrotações acompanhadas semanalmente no verão e bi-semanalmente no inverno, o coeficiente de correlação (r) entre acúmulo de forragem e acúmulo graus-dia e unidades fototérmicas foi de 0,85.

Tabela 7. Coeficientes de correlação (r) entre acúmulo de forragem (AF) e taxa média de acúmulo (TMA) e variáveis climáticas nas rebrotações ao longo do período experimental

Cultivar	Resposta	GD	UF	Nméd ¹	Tméd ²	Tmáx ²	Tmín ²
Atlas	AF	0,37	ns [§]	0,38	0,49	0,34	0,56
	TMA	0,39	ns	0,52	0,60	0,45	0,66
Massai	AF	ns	ns	0,36	0,36	0,21	0,43
	TMA	0,32	ns	0,62	0,62	0,47	0,66
Mombaça	AF	0,34	ns	0,68	0,72	0,56	0,79
	TMA	0,32	ns	0,75	0,77	0,62	0,83
Tanzânia	AF	0,36	ns	0,43	0,57	0,53	0,55
	TMA	ns	ns	0,63	0,75	0,72	0,73
Tobiatã	AF	0,37	ns	0,58	0,72	0,68	0,72
	TMA	ns	ns	0,75	0,86	0,83	0,85

§ ns – não-significativa a $P = 0,05$.

¹ Fotoperíodo médio

² Temperaturas média, máxima e mínima

As correlações entre acúmulo de forragem e temperatura média foram maiores que aquelas reportadas por Burton et al. (1988) ($r = 0,46$ para *Cynodon dactylon* cv. Coastal), exceto para o capim Massai. As correlações usando temperaturas máximas e mínimas confirmam a associação dessas variáveis com produção de forragem e, de um modo geral, as correlações com taxa média de acúmulo foram maiores que aquelas com acúmulo pois a taxa média de acúmulo conseguiu diminuir o efeito de diferentes intervalos entre desfolhas utilizados no experimento, utilizando valores trazidos para um denominador comum ($\text{kg MS ha}^{-1}\text{dia}^{-1}$). Para Atlas e Massai as correlações foram mais baixas provavelmente devido à menor TBI encontrada para esses cultivares. Assim, durante o período de inverno, não ocorreram condições para que houvesse reduções mais expressivas na produção, o que limitou ainda mais a amplitude de valores de r .

A temperatura tem efeito marcante sobre diversos processos metabólicos nas plantas, entre eles fotossíntese, respiração e taxa de expansão foliar, o que faz com que a temperatura esteja intimamente ligada ao processo de acúmulo de forragem (Rodrigues & Rodrigues, 1987) e seja um dos principais responsáveis pela estacionalidade de produção. Porém, nos trabalhos de Ghelfi Filho (1972) e Pedreira & Mattos (1981) a taxa máxima de acúmulo não coincidiu com a máxima temperatura, indicando a existência de outros fatores influenciando na produção de forragem. Sinclair et al. (2001) e Sinclair et al. (2003), para o capim Pensacola (*Paspalum notatum* Flugge) e para capins do gênero *Cynodon* (Tifton-85, Florakirk e Florona), mediram produções cerca de duas vezes maiores quando o fotoperíodo foi artificialmente aumentado durante os meses de inverno, mostrando o marcante efeito do fotoperíodo na produção de forragem. Os autores concluíram que o melhoramento genético visando identificar capins cuja resposta ao fotoperíodo seja menor (ou inexistente) pode trazer grandes incrementos à produção anual de forragem. Os coeficientes de correlação entre acúmulo ou taxa de acúmulo de forragem e o fotoperíodo foram menores que o reportado por Burton et al. (1988) ($r = 0,95$), mas ainda assim mostram a associação entre esse fator ambiental e o desempenho produtivo das gramíneas estudadas, ainda que seu efeito seja menor que o da temperatura (Tabela 6). Para Bauer et al. (1984) o efeito da temperatura possui maior importância relativa, embora separar o efeito de temperatura e fotoperíodo seja difícil (Rolim, 1980).

4.2.3 Ajuste dos modelos de produção baseados na unidade fototérmica

Modelos não-lineares foram ajustados para cada cultivar utilizando-se os dados coletados ao longo de duas rebrotações no verão (janeiro a fevereiro) e uma no inverno (junho a agosto) (Tabela 8).

Tabela 8. Parâmetros dos modelos utilizados para descrever as variações do acúmulo de forragem em função de unidades fototérmicas em rebrotações de verão e inverno

Cultivar	Verão			Inverno		
	a kg MS ha ⁻¹	x ₀	b	a kg MS ha ⁻¹	x ₀	b
Atlas	2163,4	2702,2	1383,8	1185,6	2200,3	1061,8
Massai	3691,4	2602,8	1687,9	1669,5	1860,5	940,2
Mombaça	2868,3	1664,6	1053,5	759,8	303,9	224,7
Tanzânia	4007,9	2914,1	1661,6	1232,4	1661,1	1465,8
Tobiatã	3114,8	1992,0	1421,8	791,1	705,0	710,6

Os modelos são do tipo logístico e têm a forma

$$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}} \quad (13)$$

Os parâmetros são ‘a’, a assíntota (valor máximo de y), ‘x₀’ o valor de x para y = a/2, o ponto de inflexão do modelo, que corresponde ao ponto de máximo da primeira derivada da função (dy/dx) (Hunt, 1982; Seber & Wild, 1989) e ‘b’ o inverso da taxa de aceleração inicial do modelo (que corresponde ao inverso da máxima taxa de crescimento relativo quando o modelo parte da origem) (Birch, 1999). Segundo Parsons et al. (1988) a primeira derivada da função logística corresponde à taxa de acúmulo instantânea e seu ponto de máximo (máxima taxa de acúmulo instantânea) ocorre um pouco antes da máxima taxa de acúmulo média [(y₁ - y₀)/x]. O valor de ‘y’ corresponde à quantidade de forragem acumulada em kg MS ha⁻¹ e ‘x’ à quantidade de unidades fototérmicas acumuladas no período.

Os modelos foram diferentes entre estações e entre cultivares ($P < 0,0001$) e, portanto, foram feitas regressões individuais para cada cultivar, dentro de cada estação.

A assíntota dos modelos de verão foi maior que a dos modelos de inverno, indicando que, provavelmente, mesmo rebrotações muito longas durante o inverno não

permitiriam produções da mesma ordem de grandeza daquelas ocorridas durante verão. O ponto de máxima taxa de acúmulo instantânea (x_0) ocorreu mais cedo nas rebrotações de inverno e a aceleração inicial de crescimento também foi maior durante o inverno (menores valores de 'b'), indicando que as máximas taxas de acúmulo (média e instantânea) ocorreram com o acúmulo de uma menor quantidade de unidades fototérmicas nesse período. Entretanto, devido às menores temperaturas e ao menor fotoperíodo de inverno, o mesmo ponto da rebrotação (máximas taxas de acúmulo média e instantânea) foi atingido após um maior período de crescimento (em dias) no inverno, apesar da menor quantidade de unidades fototérmicas acumuladas.

Embora os modelos logísticos e seus parâmetros tenham significado biológico, ao contrário do que acontece quando se usam equações polinomiais como modelos (Hunt, 1982), os parâmetros das regressões determinadas no presente estudo, com exceção da assíntota, não são comparáveis pois a escala temporal à qual estão relacionados é diferente entre os cultivares. O parâmetro x_0 indica o valor de x (unidades fototérmicas acumuladas) em que ocorre a máxima taxa de acúmulo instantânea e b , que refere-se a uma taxa (inverso da taxa de aceleração inicial do modelo) (Birch et al., 2001), portanto, dependente da escala temporal utilizada. Isso se deve às diferentes TBis utilizadas para o cálculo do acúmulo de UFs para cada cultivar, que fez com que capins crescendo no mesmo período de tempo (sob as mesmas temperaturas e o mesmo fotoperíodo) acumulassem quantidades diferentes de unidades fototérmicas (Tabela 9). O uso da equação logística na descrição de vários aspectos do crescimento vegetal vem de longa data. Hunt (1982) citou inúmeros trabalhos em que a função foi empregada. Ludlow & Charles-Edwards (1980), Parsons et al. (1988), Cacho (1993), Birch (1999) e Peek et al. (2002) também discutiram a não linearidade do crescimento vegetal e a função logística é apontada como uma boa aproximação na determinação de curvas de crescimento. Como o crescimento de folhas, que foi o principal componente do acúmulo de forragem (apresentou alta correlação com acúmulo de forragem; $r = 0,99$; $P < 0,0001$), responde à temperatura (Peakock, 1975a, b, c) e ao fotoperíodo (Hay, 1990) de forma não linear, o acúmulo de unidades fototérmicas se acompanha a velocidade de crescimento das plantas em resposta às variações nesses fatores ambientais.

Tabela 9. Unidades fototérmicas acumuladas ao longo das rebrotações de verão e inverno utilizadas para a composição dos modelos

Cultivar	Verão	Inverno
Atlas	5200	4200
Massai	6100	5300
Mombaça	3600	2500
Tanzânia	6500	4500
Tobiatã	6000	3800

O poder preditório dos modelos pode ser avaliado comparando-se a produção estimada com a produção medida dentro das rebrotações (dados não apresentados) e das estações, bem como da produção total de forragem (Tabela 10). Na maioria das rebrotações a diferença entre os valores observados e preditos foi menor que ou próxima do coeficiente de variação das medições de produção (Tabela 4). No entanto, a ocorrência de super e subestimativas, ocorridas principalmente durante o inverno (época em que ocorre o florescimento dos capins) e início do verão e nos capins Atlas e Tanzânia, sugerem a necessidade de se acompanhar um maior número de rebrotações para que a variabilidade nos valores das respostas dos capins às variáveis climáticas seja contemplada (Tabela 10).

Tabela 10. Valores de produção de forragem observada *versus* a estimada pelos modelos

Cultivar	Verão		Inverno		Total	
	Observada	Prevista	Observada	Prevista	Observada	Prevista
	----- kg MS ha ⁻¹ -----					
Atlas	10038	14375	1866	3173	11905	17550
Massai	23366	26070	5719	4906	29086	30975
Mombaça	17607	19108	2079	2280	19686	21387
Tanzânia	15386	18060	5152	3450	20539	21510
Tobiatã	16086	15286	5046	2360	21133	17647

A evolução do acúmulo e das taxas médias de acúmulo de forragem $[(y - y_0)/x]$, calculadas a partir das produções estimadas pelos modelos, são apresentadas na Figura 5. A máxima taxa de acúmulo de forragem foi obtida no momento em que haviam sido acumuladas 4100 e 3300 UF no verão e inverno, respectivamente, para o cultivar Atlas, 4100 e 2800 para o cultivar Massai, 2600 e 600 para o cultivar Mombaça, 4400 e 2600 para o cultivar Tanzânia e 3100 e 1200 para o cultivar Tobiatã. O período de tempo necessário para o acúmulo desses totais de UF corresponde ao momento ideal para a realização da desfolha. Segundo Parsons et al. (1982), para que se obtenha a produção potencial ao longo de um dado período de tempo deve-se buscar manter a taxa média de acúmulo de forragem em valores máximos.

Os capins Mombaça e Tobiatã, com TBis maiores, acumularam menor quantidade de UFs durante o inverno e logo atingiram valores assintóticos, também mais baixos.

Figura 5 - Curvas de taxa média de acúmulo de verão (círculos cheios) e de inverno (círculos vazios) estimadas a partir dos modelos de acúmulo de forragem (verão – linha cheia; inverno – linha tracejada)

4.3 Características morfofisiológicas e suas respostas a fatores climáticos

4.3.1 Componentes do acúmulo de forragem

O acúmulo de folhas também foi modelado em função do acúmulo de unidades fototérmicas utilizando-se a mesma função logística com três parâmetros utilizada para acúmulo de forragem (Tabela 11). Os modelos foram diferentes entre cultivares e estações ($P < 0,0001$).

Tabela 11. Parâmetros dos modelos utilizados para descrever as variações do acúmulo de folhas em função de unidades fototérmicas em rebrotações de verão e inverno

Cultivar	Verão			Inverno		
	a	x_0	b	a	x_0	b
	kg MS ha ⁻¹			kg MS ha ⁻¹		
Atlas	1771,1	2363,2	1391,6	1016,4	2360,6	1007,0
Massai	3370,4	2444,9	1673,5	1591,9	1931,9	957,5
Mombaça	2461,4	1364,4	921,6	717,4	335,9	233,6
Tanzânia	3300,6	3426,5	1899,9	981,5	1578,7	1196,4
Tobiatã	2734,7	1758,8	1276,5	738,4	907,1	681,9

As assíntotas calculadas para acúmulo de folhas foram menores que aquelas para acúmulo de massa total, o que indica que após o acúmulo máximo de folhas ser atingido, continua havendo acúmulo de forragem devido ao acúmulo das frações haste e material morto. As frações haste e material morto não foram modeladas devido ao desvio da normalidade na distribuição dos erros, uma das condições básicas para a análise de regressão (Ratkowsky, 1990). Houve, todavia, aumento no acúmulo de hastes em função do acúmulo de unidades fototérmicas (Figura 6) e na produção de hastes e material morto com o aumento da quantidade de luz interceptada pelo dossel (Figura 7). Durante a fase inicial da rebrota o acúmulo de hastes e material morto é praticamente

nulo e, portanto, o acúmulo de forragem nessa fase é composto essencialmente por folhas.

Figura 6 - Evolução do acúmulo de hastes em função da quantidade de UFs acumuladas ao longo das rebrotações (médias do verão e inverno) em capins do gênero *Panicum*

O momento da rebrotação em que o acúmulo de hastes começa a ser expressivo é muito próximo ao ponto de máxima taxa média de acúmulo (Seção 4.2.3), um indicativo de que a forragem colhida quando a taxa média de acúmulo é máxima contém baixa proporção de hastes. Isso, além de aumentar o valor nutritivo da forragem colhida (Brâncio et al., 2002 reportaram maiores valores de lignina e menores valores de proteína bruta nas hastes em relação aos colmos nos capins Massai, Mombaça e Tanzânia), pode facilitar o controle do resíduo pós-pastejo. A altura do resíduo pode estar associada à altura da camada de folhas ou à barreira formada pelas hastes, bainhas e material morto na parte basal da planta (Laca & Ungar, 1992; Brâncio et al., 2003; Carnevalli, 2003). Carnevalli (2003) encontrou dificuldade em controlar a altura do resíduo pós-pastejo do capim Mombaça quando a desfolha foi postergada até que quase toda luz fosse interceptada. O mesmo foi reportado por Gomes (2001), que impôs diferentes intensidades de desfolha (4, 8 e 12% de oferta de forragem) a cada 35 dias no capim Mombaça.

Segundo Hodgson (1990) e Lemaire & Chapman (1996), o aumento na taxa de senescência ao longo da rebrotação leva à redução na taxa de acúmulo líquido, até o ponto em que a produção de novos tecidos é totalmente compensada pela senescência. Quando a interceptação de luz é quase total, acima de 95%, os acúmulos de hastes e material morto aumentaram exponencialmente (Figura 6). Ao longo do desenvolvimento da comunidade de plantas, com o aumento da área foliar e consequentemente da interceptação da radiação pelo dossel, ocorre a sobreposição de folhas jovens às folhas velhas. A brusca redução na quantidade de radiação que incide sobre as folhas mais velhas causa grande redução na sua capacidade fotossintética, geralmente levando à senescência (Acock, 1991). Para que as folhas novas se sobreponham às folhas velhas e assim, não se desenvolvam em ambiente sombreado, camada de folhas deve ser elevada no perfil do dossel através do alongamento das hastes (Carnevalli, 2003). Bueno (2003) encontrou grandes acréscimos na proporção das frações hastes (8 e 14 %) e material morto (6,5 e 9,7%) do capim Mombaça quando a desfolha foi realizada com aproximadamente 100% de interceptação da luz incidente em comparação com desfolhas realizadas quando a IL era de 95%. Carnevalli (2003) relatou taxas de

alongamento de hastes de 0,19, 0,25 e 0,33 cm perfilho⁻¹ dia⁻¹ respectivamente para as fases inicial, intermediária e final da rebrotação para o capim Mombaça.

Figura 7 - Acúmulo de hastes e material morto de cinco capins do gênero *Panicum* em função da IL do dossel. Dados médios dos cinco cultivares

4.3.2 Fotossíntese, IAF e interceptação luminosa do dossel

As taxas de fotossíntese do dossel simuladas pelo modelo de Boote & Jones (1987) foram diferentes entre cultivares ($P=0,0001$; Tabela 12) e, apesar dos IAFs terem sido diferentes ($P=0,0047$) (Tabela 12) os ângulos foliares (em média 56,5; $P=0,1908$) e o coeficiente de extinção luminosa (em média 0,76; $P=0,2614$) não diferiram. As taxas de fotossíntese de dossel foram fortemente afetadas pelas taxas de fotossíntese máxima (fotossíntese foliar) (Tabela 12). As diferenças nessas características entre os cultivares

ocorreram em proporções similares e, além disso, as diferenças no IAF médio dos cultivares foi menor que a diferença na fotossíntese foliar.

Tabela 12. Médias das taxas de fotossíntese foliar (por área de folha) e fotossíntese de dossel (por área de solo) e do IAF medidos ao longo das rebrotações acompanhadas

Cultivar	Fotossíntese foliar	Fotossíntese de dossel	IAF
	-----mg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹ -----		
Mombaça	1,15 (0,023) a	1,66 (0,061) a	2,68 (0,12) a
Tobiatã	1,13 (0,016) ab	1,56 (0,038) ab	2,55 (0,08) a
Tanzânia	1,08 (0,018) b	1,45 (0,043) b	2,62 (0,09) ab
Atlas	0,99 (0,023) c	1,44 (0,061) b	2,25 (0,12) bc
Massai	0,76 (0,023) d	1,08 (0,061) c	2,00 (0,12) c

Médias na mesma coluna seguidas de mesma letra não diferem entre si ($P \geq 0,05$).

Valores entre parênteses correspondem ao erro padrão da média.

Ainda que mais produtivo, o capim Massai foi o que apresentou menores taxas fotossintéticas, ilustrando a importância de outros processos fisiológicos como a respiração e a partição dos fotoassimilados no processo de acúmulo de forragem. Zelitch (1982) salientou que a assimilação bruta de carbono não se transforma necessariamente em produção colhível, sendo que materiais que possuem maior taxa assimilatória podem sofrer grandes perdas respiratórias ou alocar o carbono assimilado a órgãos não colhíveis. Embora as taxas de fotossíntese de dossel sejam estimadas a partir de taxas de fotossíntese foliar líquida, grandes quantidades do carbono podem ser perdidas devido à respiração noturna, mesmo se a assimilação líquida de carbono durante o dia for elevada (Robson, 1982; Zelitch, 1982).

Apesar de ter maior RAF e RMF (Tabela 13), o Massai apresentou menor IAF em relação aos demais cultivares ($P=0,0047$). O resíduo pós-corte dos demais cultivares foi quase duas vezes maior que o do capim Massai (7000 e 4000 kg MS ha⁻¹ respectivamente), e, mesmo com o maior acúmulo de forragem, fez com que a massa de

forragem total fosse sempre menor para o Massai. Isso provavelmente foi a causa da menor ‘diluição’ da massa de folhas na massa total. A maior proporção de órgãos fotossintetizantes e a menor massa total de forragem, o que representa também um menor custo respiratório, provavelmente são a causa de a maior produção de forragem ter sido obtida pelo cultivar com menor taxa de fotossíntese.

Tabela 13. Área foliar específica (AFE), razão de massa de folhas (RMF) e razão de área foliar (RAF), os ‘componentes morfológicos’ da taxa de crescimento relativo de capins do gênero *Panicum*

Cultivar	AFE cm ² g ⁻¹	RMF g g ⁻¹	RAF cm ² g ⁻¹
Massai	142,8	0,494 a	70,54
Tobiatã	170,3	0,362 b	61,64
Mombaça	164,3	0,361 b	59,31
Tanzânia	163,5	0,329 b	53,79
Atlas	177,7	0,324 b	57,57

Médias na mesma coluna seguidas de mesma letra não diferem entre si ($P \geq 0,05$).

Além de aspectos fisiológicos, existe a influência da composição morfológica da planta no processo produtivo (Lambers, 1987). A razão de área foliar (RAF), que é a razão entre a área foliar e a massa total da planta (Radford, 1967; Hunt, 1982), é considerada o ‘componente morfológico’ da taxa de crescimento relativo (TCR), que tem a taxa assimilatória líquida (TAL) como ‘componente fisiológico’ (Lambers, 1987). Os trabalhos de Higgs & James¹, comparando gramíneas de crescimento rápido e lento, e de Dijkstra & Lambers², citados por Lambers (1987), permitiram a conclusão de que o ‘componente morfológico’ foi o principal determinante das taxas de crescimento de algumas plantas.

¹ HIGGS, D.E.; JAMES, D.D. Comparative studies on the biology of upland grasses. I. Rate of dry matter production and its control in four grasses species. **Journal of Applied Ecology**, v. 57, p. 553-564, 1969.

² DIJKSTRA, P.; LAMBERS, H. Photosynthesis and respiration of two inbred lines of *Plantago major* L. differing in relative growth rate. In: MARCELL, R.; CLIJSTERS, H.; Van POUCKE, M. (Ed.). **Biological control of photosynthesis**. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1986. p.251-255.

Segundo Radford (1967) e Hunt (1982), a RAF resulta do produto da área foliar específica (AFE, cm^2g^{-1}) pela razão de massa foliar (RMF, massa de folhas/massa total da planta) ou da divisão do IAF pela massa total da planta. Assim, variações na RAF, que quantifica a porção ‘fotossinteticamente ativa’ da planta, podem ser devidas a diferentes ‘investimentos’ em massa de folhas (RMF) e/ou a variações na AFE (Lambers, 1987). Além disso, diferenças no IAF e na massa total da planta também afetam a RAF.

Ao longo das rebrotações, entretanto, a taxa de fotossíntese de dossel apresentou alta correlação com o acúmulo de forragem total e de folhas ($r = 0,76$ e $0,78$ respectivamente; $P < 0,0001$) comprovando a grande importância dessa característica fisiológica no processo produtivo, embora nem sempre seja a única responsável por diferenças produtivas entre algumas plantas de gêneros, espécies e até cultivares diferentes (Lambers, 1987). Assim, as maiores taxas apresentadas pelos capins Mombaça e Tobiatã, embora não resultando em maiores produções, indicam a possibilidade de o manejo não ter permitido que o potencial produtivo desses capins fosse atingido.

Taxas de fotossíntese foliar apresentaram baixa correlação com acúmulo de forragem ($r = 0,17$; $P = 0,016$). Essa correlação, embora significativa, mostra a baixa associação entre produção e fotossíntese de folhas individuais, já que uma única folha não consegue representar todas as categorias de folhas presentes e seus respectivos potenciais fotossintéticos, além de não considerar o tamanho do aparato fotossintético da planta (Nelson et al., 1975 e Zelitch, 1982). Características do dossel como interceptação de luz ($r = 0,70$; $P < 0,0001$), o IAF ($r = 0,89$; $P < 0,0001$) e a capacidade fotossintética das folhas ($r = 0,77$; $P < 0,0001$) apresentaram forte associação com a taxa fotossintética do dossel. A taxa de fotossíntese foliar, no entanto, não apresentou correlações expressivas com as características do dossel, estando mais associada a características da própria folha como idade e histórico de exposição ao sol (Norman & Arkebauer, 1991).

A taxa média de fotossíntese de dossel do inverno ($1,14 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) correspondeu a cerca de 66% da média de verão ($1,73 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) o que ajuda a explicar a estacionalidade da produção de forragem. Essa diferença entre as taxas

($P < 0,0001$), no entanto, é provavelmente devida, em parte, à redução do IAF no inverno (em média 2,91 no verão e 1,92 no inverno; $P = 0,0001$) e, em parte, à redução da taxa de fotossíntese foliar (em média $1,17 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ no verão e $0,88 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ no inverno; $P < 0,0001$).

O padrão observado da evolução das taxas de fotossíntese de dossel com o aumento do IAF (Figura 8) também foi reportado por Ludlow & Charles-Edward (1980) e Morgan & Brown (1983). As taxas de fotossíntese foliar também apresentaram o mesmo padrão, porém as diferenças entre os cultivares foram mais acentuadas (Figura 9). Com o aumento no IAF, a maior quantidade de folhas conseguiu compensar a queda na taxa de fotossíntese de folhas individuais, já que a taxa de fotossíntese de dossel continuou aumentando.

Figura 8 - Variação da Fotossíntese de dossel de capins do gênero *Panicum* em função do IAF (média de cinco cultivares em duas rebrotações de verão e uma de inverno)

Figura 9 - Variação da taxa de fotossíntese foliar em função do IAF em capins do gênero *Panicum* ao longo de duas rebrotações de verão e uma de inverno (médias entre as rebrotações)

As variações de IAF e IL foram bem descritas pela mesma função logística, com três parâmetros, utilizada anteriormente (tabelas 14 e 15). Houve diferença significativa ($P < 0,0001$) entre os modelos de todos os cultivares, tanto nos de IAF como nos de IL. As assíntotas para IAF no verão foram maiores, exceto para Massai (Tabela 14), porém a interceptação de luz tendeu a um mesmo valor tanto no verão como no inverno (Tabela 15). Isso poderia ocorrer devido à redução da radiação incidente durante o inverno e por arranjos diferentes da folhagem, como folhas mais planas durante o inverno. No entanto, os ângulos foliares ($P = 0,1170$) (em graus, em relação à horizontal) e o coeficiente de extinção luminosa ($P = 0,0527$) não diferiram entre estações (valores médios de 56,5 e 0,56 respectivamente), o que anula tal possibilidade. Fagundes et al. (2001) encontrou maiores coeficientes de extinção luminosa em pastos de *Cynodon* spp. mais altos, o que estaria associado a folhas maiores e ângulos foliares menores. Outra possibilidade seria a maior participação de outros componentes, como material morto, interferindo na interceptação de luz. Teixeira et al. (1999) e Pedreira & Rosseto (2002) encontraram aumento gradual na proporção de material morto com o avanço da estação seca. Bueno (2003) encontrou maior proporção de material morto durante o outono e inverno (inverno agrostológico).

Tabela 14. Parâmetros dos modelos utilizados para descrever as variações do IAF em função de unidades fototérmicas em rebrotações de verão e inverno

Cultivar	Verão			Inverno		
	a	x_0	b	a	x_0	b
Atlas	3,67	541,9	614,7	3,19	-206,6	2733,3
Massai	3,60	260,4	152,2	77,40	17355,0	4352,8
Mombaça	5,05	583,4	495,4	3,38	10,0	1050,2
Tanzânia	7,21	2721,8	1826,0	3,86	1088,5	1048,2
Tobiatã	4,77	554,6	707,5	3,33	751,9	1212,0

Tabela 15. Parâmetros dos modelos utilizados para descrever as variações da IL em função de unidades fototérmicas. A assíntota (a) corresponde à fração máxima da radiação interceptada

Cultivar	Verão			Inverno		
	a	x_0	b	a	x_0	b
Atlas	0,99	-4411,9	2139,1	0,95	-3299,5	1875,4
Massai	0,98	-946,5	658,7	0,96	-359,4	888,5
Mombaça	0,98	-1658,0	1017,3	0,96	-1343,3	821,6
Tanzânia	0,95	-26,9	79,1	0,95	-229,6	511,3
Tobiatã	0,96	-30,7	66,4	0,95	-325,1	451,9

Os valores do IAF e da IL dos dosséis foram simulados para o ponto de máxima taxa média de acúmulo (Tabela 16). Os IAFs para máxima taxa média de acúmulo (IAF ótimo) no verão foram próximos a 4,0 e corresponderam à interceptação de quase toda a radiação incidente, mas não necessariamente 95% (Brown & Blaser, 1968). No inverno os valores de IAF ótimo e da IL foram menores, provavelmente devido à menor intensidade luminosa desse período (Brown & Blaser, 1968).

IL e IAF apresentaram alta correlação entre si (Figura 10), como descrito por Brougham (1956) e, mais recentemente por Carnevali (2003) e Mello & Pedreira (2004) para os capins Mombaça e Tanzânia, respectivamente.

Tabela 16. Valores de IAF e IL para máxima taxa média de acúmulo, simulados através dos modelos que descrevem a evolução dessas características em função do acúmulo de unidades fototérmicas

Cultivar	IAF		IL	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno
			-----%-----	
Atlas	3,65	2,48	97	92
Massai	3,60	2,64	98	93
Mombaça	4,96	2,15	97	88
Tanzânia	5,15	3,12	95	94
Tobiatã	4,60	1,96	96	91
Médias	4,40	2,47	96	91

Figura 10 - Correlação entre IL e IAF de cultivares de *Panicum* ao longo de rebrotações de verão e inverno ($r=0,67$; $P<0,0001$)

4.3.3 Altura do dossel

A variação na altura do dossel também foi bem descrita por modelos baseados no acúmulo de unidades fototérmicas. A mesma função logística com três parâmetros (Tabela 17) foi utilizada na determinação dos modelos, distintos para cada cultivar ($P < 0,0001$). A máxima taxa média de acúmulo foi atingida quando o dossel atingiu 75 cm para Atlas, 55 cm para Massai, 93 cm para Mombaça e Tobiatã e 81 cm para Tanzânia, durante o verão. No inverno as alturas foram 50 cm para Atlas, 43 para Massai, 57 cm para Mombaça e Tanzânia e 54 cm para Tobiatã. Esses valores são muito similares aos valores máximos de altura (parâmetro 'a' dos modelos) pois essa característica atingiu valores assintóticos antes do acúmulo de forragem (Figura 11).

Mello & Pedreira (2004) reportaram que o dossel de capim Tanzânia atingia 95% de IL com aproximadamente 55 cm de altura. Para o capim Mombaça, Carnevalli (2003) obteve valores próximos a 90 cm para essa mesma condição durante o verão agrostológico, porém, durante o inverno, as alturas foram praticamente as mesmas. Kephart et al. (1992) observou redução mais acentuada na produção de hastes em relação à produção de folhas com a redução da radiação incidente em 'switchgrass' (*Panicum virgatum* Michx. cv. Cave-in-Rock), o que sugere que durante o inverno, menores alturas podem ser resultado de menor produção de hastes.

Tabela 17. Parâmetros dos modelos utilizados para descrever as variações da altura em função de unidades fototérmicas

Cultivar	Verão			Inverno		
	a (cm)	x_0	b	a (cm)	x_0	b
Atlas	75,80	24,18	476,38	50,61	-66,55	85,92
Massai	55,05	202,20	217,45	43,50	57,22	81,47
Mombaça	92,73	64,34	124,59	57,77	-4,93	33,75
Tanzânia	81,23	35,28	148,16	73,66	-2718,07	4600,29
Tobiatã	92,81	55,83	132,01	81,72	-2047,22	4658,97

A altura do dossel apresentou boas correlações com características morfofisiológicas (IAF, $r = 0,74$; IL, $r = 0,57$ e taxas de fotossíntese de dossel, $r = 0,81$; todos com $P < 0,0001$) e produtivas (acúmulo de forragem, $r = 0,77$ e acúmulo de folhas, $r = 0,76$, ambos com $P < 0,0001$), o que sugere a possibilidade de utilizar-se essa característica como uma ferramenta de manejo, de acordo com o proposto por Hodgson (1990) para *Lolium perenne* (L.) e Carnevalli (2003) para o capim Mombaça.

As alturas, porém, entraram em assíntota antes que o acúmulo de forragem, ou seja, quando as variações em altura passam a ser muito pequenas ou até nulas, continua a haver o acúmulo de forragem (Figura 11), o que levou ao aumento na densidade volumétrica do dossel. Analogamente, a massa do resíduo aumentou ao longo do período experimental ($P < 0,0001$) sem aumentos correspondentes na altura do resíduo (Tabela 4), causando aumentos na densidade volumétrica da forragem do resíduo. Em *Cynodon* spp., Carnevalli et al. (2000) e Carnevalli et al. (2001), mantendo o dossel em alturas constantes, também observaram variações na massa de forragem ao longo do ano. Mello & Pedreira (2004) controlaram a massa do resíduo pós-pastejo do capim Tanzânia, porém constataram variações na altura. Assim, variações na densidade volumétrica da forragem podem levar a variações em outras características do dossel, que não são necessariamente acompanhadas por variações em altura.

Figura 11 - Evolução da altura do dossel (linhas claras) e do acúmulo de forragem (linhas escuras) em função do acúmulo de unidades fototérmicas (UF) em rebrotações de verão e inverno

5 CONCLUSÕES

O grande potencial de produção apresentado pelos cultivares de *Panicum* spp. pode justificar o uso de tecnologias com o objetivo de se maximizar a eficiência de sistemas de produção. Nesse contexto, o uso do modelo de unidades fototérmicas é factível e eficiente como ferramenta de previsão de produção de forragem ao longo do ano, desde que não haja limitações de água e nutrientes. Além disso, o modelo se ajustou bem às respostas morfofisiológicas, permitindo buscar melhores estratégias de manejo e determinar alguns parâmetros para o melhoramento genético de gramíneas forrageiras tropicais.

Tanto temperatura como fotoperíodo atuam sobre a produção de capins do gênero *Panicum*, sendo alguns dos fatores responsáveis pela sua estacionalidade sob irrigação. Entretanto, tais fatores não atuam isoladamente e é difícil quantificar sua contribuição individual. A ação conjugada desses fatores sobre o acúmulo de forragem pôde ser descrita através da unidade fototérmica, embora estudos que contemplem uma maior amplitude de respostas da planta, tanto a variáveis climáticas como a fatores de manejo, sejam necessários para que o uso desse modelo se consolide como uma ferramenta de uso consagrado no planejamento do uso e no estudo de plantas forrageiras.

Os capins estudados apresentaram diferentes valores de IAF, IL e altura para a máxima taxa média de acúmulo (apenas Mombaça e Tobiata apresentaram desempenho semelhante) entre si, resultado das diferenças morfológicas entre os capins, e entre estações, provavelmente como resposta à redução nas temperaturas, no fotoperíodo e na radiação incidente.

As taxas de fotossíntese de dossel diferiram entre cultivares e o cultivar mais produtivo não foi aquele com maior taxa fotossintética, indicando a importância de outros aspectos (e.g. morfologia e manejo) e outros processos fisiológicos envolvidos no processo de acúmulo de forragem (e.g., partição de fotoassimilados). No entanto, ao longo do desenvolvimento da comunidade de plantas, taxas de fotossíntese de dossel apresentaram alta correlação com acúmulo de forragem e, portanto, os capins Mombaça e Tobiatã, com maiores taxas de fotossíntese de dossel, provavelmente apresentam maior potencial produtivo, desde que manejados corretamente .

A altura do dossel correlacionou-se bem, tanto com características morfofisiológicas como produtivas, o que a torna uma ferramenta possível de ser empregada no manejo do pastejo. Entretanto, foram observados aumentos na massa do resíduo, sem aumentos correspondentes na altura. Por isso, um maior número de estudos, que amplie o banco de dados disponível é necessário, bem como a padronização da metodologia de determinação da altura, ainda pouco especificada na literatura.

Bancos de dados mais abrangentes e mais ricos, contemplando a máxima variabilidade possível, são necessários para que o modelo de unidades fototérmicas se estabeleça como uma ferramenta de planejamento de produção e manejo do pastejo. A representatividade das condições encontradas em sistemas de produção, fará que o uso dos modelos não se restrinja às condições do lugar ou da época em que foram gerados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOCK, B. Modeling canopy photosynthetic response to carbon dioxide, light interception, temperature, and leaf traits. In: BOOTE, K. J., LOOMIS, R. S. (Ed.). **Modeling crop photosynthesis – from biochemistry to canopy**. Madison: CSSA; ASA, 1991. cap.3, p.41-55.
- ALCÂNTARA, P.B.; PEDRO, J.R.; DONZELLI, P.L. Zoneamento edafoclimático de plantas forrageiras. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSISTEMAS DE PASTAGENS, 2., Jaboticabal, 1989. **Anais**. Jaboticabal: FUNEP, 1989. p.1-16.
- ALVIM, M.J.; BOTREL, M.A.; NOVELLY, P.E. Produção de gramíneas tropicais e temperadas, irrigadas na época seca. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.15, n.5, p.384–392, 1986.
- ARONOVICH, S. O capim colônia e outros cultivares de *Panicum maximum* (Jacq.): Introdução e evolução do uso no Brasil. In.: SIMPÓSIO DE MANEJO DE PASTAGENS – O CAPIM COLÔNIA, 12., Piracicaba, 1995. **Anais**. Piracicaba: FEALQ, 1995. p.1-20.
- BATES, D.M.; WATTS, D.G. **Nonlinear regression analysis and its applications**. John Wiley, 1988. 365 p. (Wiley series in probability and mathematical statistics).

- BAUER, A.; FRANK, A.B.; BLACK, A.L. Estimation of spring wheat leaf growth rate and anthesis from air temperature. **Agronomy Journal**, v. 76, p.829-835, 1984.
- BERNARDES, M. S. Modelagem matemática aplicada à agricultura. FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **AGRIANUAL**, 2000. Anuário de agricultura brasileira. São Paulo, 2000. p.80-81.
- BERNARDES, M.S. Fotossíntese no dossel de plantas cultivadas. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA; T. (Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira de Potassa e do Fosfato, 1987. p.13-48.
- BIRCH, C.P.D. A new generalized logistic sigmoid growth equation compared with the Richards growth equation. **Annals of Botany**, v.83, p.713-723, 1999.
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W. Equations to define canopy photosynthesis from quantum efficiency, maximum leaf rate, light extinction, leaf area index, and photon flux density. In: BIGGINS, J. (Ed.). **Progress in photosynthesis research**. The Hague: Martinus Nijhoff Publ., 1987. v.4, p.415-418.
- BOOTE, K.J.; LOOMIS, R.S. The prediction of canopy assimilation. In: BOOTE, K.J.; LOOMIS, R.S. (Ed.). **Modeling crop photosynthesis – from biochemistry to canopy**. Madison: CSSA; ASA , 1991. p.109-140.
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOON, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In. PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Ed.). **Agricultural systems modeling and simulation**. Nova York: Marcel Dekker, 1998. p.651-692.
- BOTREL, M.A.; ALVIM, M.J.; XAVIER, D.F. Efeito da irrigação sobre algumas características agronômicas de cultivares de capim-elefante. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.26, n.10, p.1731-1736. 1991.

- BRAGA, G.J. Resposta do Capim-Mombaça (*Panicum maximum* Jacq.) a doses de nitrogênio e intervalos de corte. Pirassununga, 2001. 121p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo.
- BRAGA, G.J.; PEDREIRA, C.G.S.; HERLING, V.R.; LUZ, P.H.C. Atenuação da capacidade fotossintética no dossel de uma pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (compact disc). In: REUNIÃO ANUAL DA SBZ, 39., Recife, 2002. **Anais**. Recife: SBZ, 2002.
- BRÂNCIO, P.A.; NASCIMENTO JÚNIOR, D.; EUCLIDES, V.P.B.; REGAZZI, A.J.; de ALMEIDA, R.G.; FONSECA, D.M. da; BARBOSA, R.A. Avaliação de três cultivares de *Panicum maximum* Jacq. sob pastejo. Composição química e digestibilidade da forragem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.31, n.4, p.1605-1613, 2002.
- BROUGHAM, R.W. Effect of intensity of difoliation on regrowth of pasture. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 7, n. 2, p. 377-387, 1956.
- BROWN, R.H.; BLASER, R.E. Leaf area index in pasture growth. **Herbage Abstracts**. v. 38, n.1, p.1-9, Mar. 1968.
- BUENO, A.A.O. Características estruturais do dossel forrageiro, valor nutritivo e produção de forragem nos pastos de capim-mombaça submetidos a regimes de lotação intermitente. Piracicaba, 2003. 124p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo.
- BURTON, G.W.; HOOK, J.E.; BUTLER, J.L.; HELLWIG, R.E. Effect of temperature, daylength, and solar radiation on production of Coastal bermudagrass. **Agronomy Journal**, v.80, p.557-560, 1988.

- CACHO, O.J. A practical equation for pasture growth under grazing. **Grass and Forage Science**, v.48, p.387- 394, 1993.
- CARNEVALLI, R.A. Dinâmica da rebrotação de pastos de capim-Mombaça submetidos a regimes de desfolhação intermitente. Piracicaba, 2003. 136p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo.
- CECATO, U.; MACHADO, A.O.; MARTINS, E.N.; et al. Avaliação da produção e de algumas características da rebrota de cultivares e acessos de *Panicum maximum* Jacq. sob duas alturas de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.29, n.3, p.660-668, 2000.
- COOPER, J.P.; TANTON, N.M. Light and temperature requirements for the growth of tropical and temperate grasses. **Herbage Abstracts**, v.38, p.167-176, 1968.
- COOPER, J.P.; WILSON, D. Variation in photosynthetic rate in *Lolium*. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 11., Surfers Paradise, 1970. **Proceedings**. Santa Lucia: University of Queensland Press, 1970. p.522-527.
- CORSI, M. Estudo da produtividade e do valor nutritivo do capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) variedade napier submetido a diferentes frequências e alturas de corte. Piracicaba, 1972. 139p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo.
- CORSI, M. Espécies forrageiras para pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DA PASTAGEM 3., Piracicaba, 1976. **Anais**. Piracicaba: ESALQ, 1976. p.5-36.

- CORSI, M.; MARTHA JÚNIOR., G.B.; NASCIMENTO JÚNIOR, D. do; et al. Impact of grazing management on productivity of tropical grasslands. In.: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS 19, Piracicaba, 2001. **Anais**. Piracicaba: FEALQ, 2001. p.801-806.
- COSTA, N.M.S. Regionalização da produção de sementes de plantas forrageiras em Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v.11, p.18-23, 1984.
- DIAS-FILHO, M. B. Colônia como planta pioneira. In.: SIMPÓSIO DE MANEJO DE PASTAGENS – O CAPIM COLÔNIA 12., Piracicaba, 1995. **Anais**. Piracicaba: FEALQ, 1995. p.305-314.
- DOVRAT, A. **Irrigated forage production**. Amsterdam: Elsevier, 1993. 257p. (Developments in Crop Science 24).
- DUNCAN, W.G. Leaf angles, leaf area, and canopy photosynthesis. **Crop Science**, v.11, p.482-485, 1971.
- DA SILVA, S.C.; PEDREIRA; C.G.S. Princípios de ecologia aplicados ao manejo da pastagem. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMAS DE PASTAGENS, 3., Jaboticabal, 1997. **Anais**. Jaboticabal: FUNEP, 1997. p.1-62.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação, 1999. 412p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - GADO DE CORTE. **Capim-massai (*Panicum maximum* cv. Massai)**: alternativa para diversificação de pastagens. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2001. 5p. (Embrapa Gado de Corte. Comunicado Técnico, 69).

- EUCLIDES, V.P.B. Valor alimentício de espécies do gênero *Panicum*. In.: SIMPÓSIO DE MANEJO DE PASTAGENS – O CAPIM COLONIAO 12., Piracicaba, 1995. **Anais** . Piracicaba: FEALQ, 1995. p.245-273.
- EUCLIDES, V.P.B.; THIAGO, L.R.L.S.; MACEDO, M.C.M.; OLIVEIRA, M.P. Consumo voluntário de forragem de três cultivares de *Panicum maximum* sob pastejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.28, n.6, p.1177-1185, 1999.
- FAGUNDES, J.L. DA SILVA, S.C.; PEDREIRA, C.G.S; SBRISSIA, A.F.; CARNEVALLI, R.A.; CARVALHO, C.A.B.; PINTO, L.F.M. Avaliação do índice de área foliar, coeficiente de extinção luminosa e acúmulo de forragem em pastagens de *Cynodon* spp. sob lotação contínua. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n. 1, p.187-195, 2001.
- FERRARIS, R. The effect of photoperiod and temperature on the first crop and ratoon growth of *Pennisetum purpureum* Schum. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.29, p.941-950, 1978.
- GHELFI FILHO, H. Efeito da irrigação sobre a produtividade do capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) variedade napier. Piracicaba, 1972. 77p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo.
- GOMES, M.A. Efeitos de intensidades de pastejo e períodos de ocupação da pastagem na massa de forragem e nas perdas e valor nutritivo da matéria seca do capim mombaça (*Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaça). Pirassununga, 2001. 93 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo.

GONÇALVES, G.D.; SANTOS, G.T. dos; CECATO, U.; JOBIM, C.C.; DAMASCENO, J.C.; FARIA, K.P. Estimativas de produção e valor nutritivo de gramíneas do gênero *Cynodon* em diferentes idades ao corte colhidas no outono. In: REUNIÃO ANUAL DA SBZ, 38., Piracicaba, 2001. **Anais**. Piracicaba: SBZ, 2001. p.61-62.

GOUDRIAAN, J.; Van LAAR, H.H. **Modeling potential crop growth processes**. Dordrecht: Kluwer academic publishers, 1994. 238p. (Current issues in production ecology).

GUTSCHICK, V.P. Modeling photosynthesis and water-use efficiency of canopies as affected by leaf traits. In: BOOTE, K.J., LOOMIS, R.S. (Ed.). **Modeling crop photosynthesis – from biochemistry to canopy**. Madison: CSSA; ASA , 1991. p.57-73.

HAY, R.K.M. The influence of photoperiod on the dry-matter production of grasses and cereals. **New Physiologist**, v.116, p.233-254, 1990.

HAY, R.K.M.; WALKER, A.J. **An introduction to the physiology of the crop yield**. New York: Longman Scientific & Technical, 1989. 292p.

HERLING, V.R.; BRAGA, G.J.; LUZ, P.H.C.; OTANI, L. Tobiata, Tanzânia e Mombaça. In.: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM 17., Piracicaba, 2000. **A planta forrageira no sistema de produção**. Piracicaba: FEALQ, 2000. p.21-64.

HODGES, H.F.; WHISLER, F.D.; BRIDGES, S.M.; REDDY, K. R.; McKINION, J.M. Simulation in crop management. In. PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Ed.) **Agricultural systems modeling and simulation**. New York: Marcel Dekker, 1998. p. 235-281.

- HODGSON, J. **Grazing management:** science into practice. Massey University: Longman Scientific & Technical, 1990. 203 p.
- HODGSON, J.; da SILVA, S.C. Options in tropical pasture management. In: REUNIÃO ANUAL DA SBZ 39., Recife, 2002. **Anais.** Recife: SBZ, 2002. p.180-202.
- HUGHES, H.D. Factors involved in animal production from temperate pastures. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 11., Surfers Paradise, 1970. **Proceedings.** Santa Lucia: University of Queensland Press, 1970. p.A 31-38.
- HUNT, R. **Plant growth curves.** New York: Edward Arnold, 1982. 248 p.
- INSTITUTO DE ZOOTECNIA **Capim Aruana (*Panicum maximum* cv. Aruana 12-5). Pré-lançamento.** Nova Odessa, 1989. 1v. (Folheto).
- JACQUES, A.V.A. Caracteres morfofisiológicos e suas implicações com o manejo. In: CARVALHO, M.M., ALVIM, M.J., XAVIER, D.F. et al. (Ed.). **Capim elefante:** produção e utilização. Coronel Pacheco: s. ed., 1994. p.31-47.
- JANK, L. Melhoramento e seleção de variedades de *Panicum maximum*. In: SIMPÓSIO DE MANEJO DE PASTAGENS – O CAPIM COLONIAO 12., Piracicaba, 1995. **Anais.** Piracicaba: FEALQ, 1995. p.21-58.
- JANK, L.; SAVIDAN, Y.; SOUZA, M.T.; COSTA, J.C.G. Avaliação do germoplasma de *Panicum maximum* introduzido da África. 1. Produção forrageira. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, v.23, p.433-440, 1994.
- JOHNSON, I.R.; PARSONS, A.J.; LUDLOW, M.M. Modelling photosynthesis in monocultures and mixtures. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.16, p.501-516, 1989.

- KEPHART, K.D.; BUXTON, D.R.; TAYLOR, S.E. Growth of C₃ and C₄ perennial grasses under reduced irradiance. **Crop Science**, v.32, p.1033-1038, 1992.
- KLEPPER, B.; RICKMAN, R.W.; PETERSON, C.M. Quantitative characterization of vegetative development in small cereal grains. **Agronomy Journal**, v.74, p.789-792, 1982.
- KORTE, C.J.; WATKIN, B.R. Use of residual leaf area index and light interception as criteria for spring-grazing management of a ryegrass-dominant pasture. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v.25, p.309-319, 1981.
- LACA, E.A.; UNGAR, E.D. Effects of sward height and bulk density on bite dimensions of cattle grazing homogeneous swards. **Grass and Forage Science**, v. 47, p.91-100, 1992.
- LAMBERS, H. Does variation in photosynthetic rate explain variation in growth rate and yield? **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v.35, p.505-519, 1987.
- LEMAIRE, G.; CHAPMAN, D. Tissue flows in grazed plant communities. In: HODGSON, J.; ILLIUS, A.W. (Ed.). **The ecology and management of grazing systems**. Guilford: CAB International, 1996. cap. 1, p.3-36.
- LINDSTROM, M.J.; BATES, D.M. Nonlinear mixed effects models for repeated measurements data. **Biometrics**, v.46, p.673-687, 1990.
- LITTELL, R.C.; MILIKEN, G.A.; STROUP, W.W.; WOLFINGER, R.D. **SAS[®] systems for mixed models**. Cary: SAS Institute, 1996. 633p.

- LOEWER JUNIOR., O.J. GRAZE: A beef-forage model of selective grazing. In: PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Ed.). **Agricultural systems modeling and simulation**. New York: Marcel Dekker, 1998. p.301-417.
- LOOMIS, R.S.; WILLIAMS, W.A. Productivity and the morphology of crop stands: patterns with leaves. In: EASTIN, J. D. **Physiological aspects of crop yield**. Madison: ASA; CSSA; SSA, 1969. p.27-47.
- LUDLOW, M.M; CHARLES-EDWARD, D.A. Analysis of the regrowth of a tropical grass/legume sward subjected to different frequencies and intensities of defoliation. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.31, p.673-692, 1980.
- MACHADO, A.O.; CECATO, U.; MIRA, R.T.; PEREIRA, L.A. F.; DAMASCENO, J.C. Avaliação da composição química e digestibilidade in vitro da matéria seca de cultivares e acessos de *Panicum maximum* Jacq. sob duas alturas de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.27, n.5, p.1057-1063, 1998.
- McWILLIAM, J.R. Response of pasture plants to temperature. In: WILSON, J.R. (Ed.) **Plant relation in pastures**. East Melbourne: CSIRO, 1978. p.17-34.
- MEDEIROS, H.R.; PEDREIRA, C.G.S.; VILLA NOVA, N.A.; BARIONI, L.G.; MELLO, A.C.L. Prediction of herbage accumulation of *Cynodon* grasses by na empirical model based on temperature na daylength. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 19., São Pedro, 2001. **Proceedings**. Piracicaba: FEALQ, 2001. p.263-265.
- MELLO, A.C.L.; PEDREIRA, C.G.S. Respostas morfológicas do Capim-Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq. cv. Tanzânia-1) irrigado à intensidade de desfolha sob lotação rotacionada. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.33, n.2, p.282-289, 2004.

- MELLO, A.C.L. de; SANTOS, P.M.; PEDREIRA, C.G.S. et al. Photosynthetic light response of Tanzânia grass under four levels of leaf temperature. In: INTERANTIONAL GRASSLAND CONGRESS, 19., São Pedro, 2001. **Proceedings**. Piracicaba: FEALQ, 2001. p. 73-74.
- MONTEIRO, F.A. *Cynodon*: Exigências minerais e adubação. In: WORKSHOP SOBRE O POTENCIAL FORRAGEIRO DO GÊNERO CYNODON, Juiz de Fora, 1996. **Anais**. Coronel Pacheco: EMBRAPA CNPGL, 1996. p. 23-44.
- MORENO, L.S.B.; MEDEIROS, H.R.; PEDREIRA, C.G.S. Estimativa de produção de forragem de grama estrela por um modelo matemático baseado na temperatura do ar e fotoperíodo (compact disc). In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 8., Piracicaba, 2000. **Anais**. Piracicaba: Novembro, 2000.
- MORGAN, J.A.; BROWN, R.H. Photosynthesis and growth of bermudagrass swards. I. Carbon dioxide exchange characteristics of swards mowed at weekly and monthly intervals. **Crop Science**, v.23, p.347-352, 1983.
- MÜLLER, M.S. Desempenho de *Panicum maximum* (cv. Mombaça) em pastejo rotacionado, sob sistema de irrigação por pivô central, na região de cerrado. Piracicaba, 2000. 101p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo.
- MURTAGH, G.J.; GROSS, H.D. Interception of solar radiation and growth rate of a grass sward. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 10., Helsinki, 1966. **Proceedings**. Helsinki: Valtioneuvostou Kirjapo, 1966. p.104-108.
- NABINGER, C.; PONTES, L.S. Morfogênese de plantas forrageiras e estrutura do pasto. In: REUNIÃO ANUAL DA SBZ, 38., Piracicaba, 2001. **A produção animal na visão dos brasileiros**. Piracicaba: SBZ, 2001. p.755-767.

NELSON, C.J.; ASAY, K.H.; HORST, G.L. Relationship of leaf photosynthesis to forage yield of tall fescue. **Crop Science**, v.15, p.476-478, 1975.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY **Engineering Statistics Handbook**. www.itl.nist.gov/div898/hadbook/index.htm. (28 Jul. 2004).

NORMAN, J.M.; ARKEBAUER, T.J. Predicting canopy photosynthesis and light-use efficiency from leaf traits. In: BOOTE, K.J., LOOMIS, R.S. (Ed.). **Modeling crop photosynthesis – from biochemistry to canopy**. Madison: CSSA; ASA, 1991. p.75-94.

PACIULLO, D.S.C. Produtividade e valor nutritivo do capim-elefante anão (*Pennisetum purpureum* Schum cv. Mott) ao atingir 80 e 120 cm de altura sob diferentes doses de nitrogênio. Viçosa, 1997. 60p. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

PARSONS, A.J.; JOHNSON, I.R.; HARVEY, A. Use of a model to optimize the interaction between frequency and severity of intermittent defoliation to provide a fundamental comparison of the continuous and intermittent defoliation of grass. **Grass and Forage Science**, v.43, p.49-59, 1988.

PARSONS, J.J. Spread of African pasture grasses of the american tropics. **Journal of Range Manegement**, v.25, n.1, p.12-17, 1972.

PEACOCK, J.M. Temperture and leaf growth in *Lolium perenne*. I. The thermal microclimate: its measurement and relation to crop growth. **The Journal of Applied Ecology**, v.12, n.1, p.99-114, 1975a.

- PEACOCK, J.M. Temperture and leaf growth in *Lolium perenne*. II. The site of temperture perception. **The Journal of Applied Ecology**, v.12, n.1, p.115-123, 1975b.
- PEARCE, R.B.; BROWN, R.H.; BLASER; R.E. Photosynthesis in plant communities as influenced by leaf angle. **Crop Science**, v.7, p.321-324, 1967.
- PEARSON, C.J.; ISON, R.L. **Agronomy of grassland systems**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 222p.
- PEDREIRA, C.G.S. Forage yield of three populations of pensacola bahiagrass as related to their physiological and morfological traits. Athens, 1992. Thesis (M.S.) – University of Georgia.
- PEDREIRA, C.G.S.; ROSSETO, F.A.A. Forage yield and utilization efficiency of ‘Tanzania’ guineagrass and ‘Guaçu’elphantgrass pastures under rotational stocking. In: ANNUAL MEETINGS ABSTRACTS, ASA – CSSA – SSSA ANNUAL MEETINGS, Indianapolis, 2002. **Proceedings**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. p.23-25.
- PEDREIRA, C.G.S.; MELLO, A.C.L. de; OTANI, L. O processo de produção de forragem em pastagens. In: REUNIÃO ANUAL DA SBZ, 38., Piracicaba, 2001. **A produção animal na visão dos brasileiros**. Piracicaba: SBZ, 2001. p. 772-807.
- PEDREIRA, J.V.S. Crescimento estacional dos capins colônia (*Panicum maximum*), gordura (*Melinis minutiflora* Pal de Beauv.), jaraguá (*Hyparrhenia rufa* [Ness] Stapf.) e pangola de Taiwan A-24 (*Digitaria pentzii* Stent.). Piracicaba, 1972. 117p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’, Universidade de São Paulo.

- PEDREIRA, J.V.S.; MATTOS, H.B. Crescimento estacional de vinte e cinco espécies ou variedades de capins. **Boletim de Indústria Animal**, v.38, n.2, p.117-143, 1981.
- PEDRO JÚNIOR, M.J.; ALCÂNTARA, P.B.; ROCHA, G.L. et al. Aptidão climática para plantas forrageiras no Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agronômico, 1990. 13p., (Boletim técnico, 139).
- PEEK, M.S.; RUSSEK-COHEN, E.; WAIT, D.A.; et al. Physiological response curve analysis using nonlinear mixed models. **Oecologia**, v.132, p.175-180, 2002.
- PENATI, M.A. Estudo do desempenho animal e produção do capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq.) em um sistema rotacionado de pastejo sob irrigação em três níveis de resíduo pós-pastejo. Piracicaba, 2002. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo.
- RADFORD, P.J. Growth analysis formulae – Their use and abuse. **Crop Science**, v.7, n.3, p.171-175, 1967.
- RATKOWSKY, D.A. **Handbook of nonlinear regression models**. New York: Marcel Dekker, 1990. 241 p. (Statistics: Textbooks and Monographs, 107).
- REID, R.L.; POST, A.J.; OLSEN, F.J.; et al. Studies on the nutritional quality of grasses and legumes in Uganda. I – Application of in vitro digestibility techniques to species and stages of growth effects. **Tropical Agriculture**, v.50, p.1-16, 1973.
- ROBSON, M.J. The growth and carbon economy of selection lines of *Lolium perenne* cv. S23 with differing rates of dark respiration 1. Grown as simulated swards during a regrowth period. **Annals of Botany**, v.49, p.321-329, 1982.

- RODRIGUES, L.R.A.; RODRIGUES, T.J.D. Ecofisiologia de plantas forrageiras. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira de Pesquisa de Potassa e do Fósforo, 1987. p.203-230.
- RODRIGUES, T.J.D.; RODRIGUES, L.R.A.; REIS, R.A. Adaptação de plantas forrageiras às condições adversas. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSISTEMAS DE PASTAGENS, 2., Jaboticabal, 1989. **Anais**. Jaboticabal: FUNEP, 1989. p.17-61.
- ROLIM, F.A. Estacionalidade de produção de forrageiras. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DAS PASTAGENS, 6., Piracicaba, 1980. **Anais**. Piracicaba: FEALQ, 1980. p. 39-81.
- RHODES, I. The relationship between productivity and some components of canopy structure in ryegrass (*Lolium* spp.) II. Yield, canopy structure and light interception. **Journal of Agricultural Science**, v.77, p. 283-292, 1971.
- RHODES, I. Relationship between canopy structure and productivity in herbage grasses and its implications for plant breeding. **Herbage Abstracts**, v.43, n.5, p.129-133, 1973.
- SAS Institute. **SAS/STAT user's guide**: version 6. 4 ed., Cary:SAS Institute, 1989, v2, 846p.
- SANDERSON, M.A.; WOLF, D.D. Morphological development of switchgrass in diverse environments. **Agronomy Journal**, v.87, p.908-915, 1995.

- SANTOS, P.M.; CORSI, M.; BALSALOBRE, M.A.A. Efeito da frequência de pastejo e da época do ano sobre a produção e qualidade de *Panicum maximum* cvs. Tanzânia e Mombaça. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.28, n.2, p.244-249, 1999.
- SAVIDAN, Y.H., JANK, L.; COSTA, J.C.G. **Registro de 25 acessos selecionados de *Panicum maximum***. Campo Grande: EMBRAPA CNPGC, 1990. 68p. (EMBRAPA-CNPGC, Documentos 44).
- SEBER, G.A.F.; WILD, C.J. **Nonlinear regression**. New York: John Wiley, 1989. 768 p. (Wiley series in probability and mathematical statistics).
- SINCLAIR, T.R., MISLEVY, P., RAY, J.D. Short photoperiod inhibits winter growth of subtropical grasses. **Planta**, v.213, p.488-491, 2001.
- SINCLAIR, T.R.; RAY, J.D.; MISLEVY, P.; et al. Growth of subtropical grasses under extended photoperiod during short-daylength months. **Crop Science**, v.43, p.618-623, 2003.
- SOTO, A.H. Um modelo simples de estimativa de produção de forragem para colônia (*Panicum maximum* Jacq.) e pangola (A-24 *Digitaria pentzii* Stent) usando parâmetros climáticos. Piracicaba, 1981. 58p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo.
- TEIXEIRA, E.I.; MATTOS, W.R.S.; CAMARGO, A.C. de et al. Avaliação de produção e utilização de uma pastagem de capim Tobiatã (*Panicum maximum* cv. Tobiatã) sob pastejo rotacionado. **Scientia Agricola**, v.56, n.2, p.349-355, 1999.

- TONATO, F. Determinação de parâmetros produtivos e qualitativos de *Cynodon* spp. em função de variáveis climáticas. Piracicaba, 2003. 85p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo.
- TOSI, P. Estabelecimento de parâmetros agronômicos para o manejo e eficiência de utilização de *Panicum maximum* Jacq. cv Tanzânia-1 sob pastejo rotacionado. Piracicaba, 1999. 103p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo.
- UEBELE, M.C. Padrões demográficos de perfilhamento e produção de forragem do capim Mombaça em pastos submetidos regimes de lotação intermitente. Piracicaba, 2002. 83p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo.
- USBERTI FILHO, J.A. **O Agrônomo**, v. 34, 1982. 7 p. (Edição especial).
- VILLA NOVA, N.A.; CARRETEIRO, M.V.; SCARDUA, R. Um modelo para avaliação do crescimento de cana-de-açúcar (*Sacharum* spp.) em termos da ação combinada do fotoperíodo e da temperatura média do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2., Campinas, 1983. **Proceedings**. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia; Instituto Agrônomo de Campinas, 1983. p.31-48.
- VILLA NOVA, N.A.; BARIONI, L.G.; PEDREIRA, C.G.S.; et al. Modelo para previsão da produtividade do capim elefante em função de temperatura do ar, fotoperíodo e frequência de desfolha. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.1, p.75-79, 1999.

- WARREN WILSON, J. Influence of spatial arrangement of foliage area on light interception and pasture growth. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 8., Reading, 1960. **Proceedings**. Oxford: Alden Press, 1961. p.275-279.
- WATSON, D.J. Comparative physiological studies on the growth of field crops. I. Variation in Net assimilation rate and leaf area between years. **Annals of Botany**, v. 11, n.41, p. 41-76, Jan. 1947.
- WATSON, D.J. The dependence of net assimilation rate on leaf-area index. **Annals of Botany**, v. 22, n.85, p.37-54, 1958.
- WELLES, J.M.; NORMAN, J.M. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. **Agronomy Journal**, v.83, n.5, p.818-825, 1991.
- WOODWARD, S.J.R. Dynamical systems models and their application to optimizing grazing management. In. PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Ed.). **Agricultural systems modeling and simulation**. New York: Marcel Dekker, 1998. p.419-473.
- ZELITCH, I. The close relationship between net photosynthesis and crop yield. **BioScience**, v.32, n.10, p.796-802, 1982.