

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Planejamento e execução de adubações nitrogenadas em pastagens em  
sistemas de produção de gado de corte no Estado de São Paulo**

**Sara de Oliveira Romeiro Lopes**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestra em Ciências. Área de concentração:  
Ciência Animal e Pastagens

**Piracicaba  
2018**

**Sara de Oliveira Romeiro Lopes**  
**Zootecnista**

**Planejamento e execução de adubações nitrogenadas em pastagens em sistemas  
de produção de gado de corte no Estado de São Paulo**  
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientadora:  
Prof. Dra. **PATRÍCIA MENEZES SANTOS**

Dissertação apresentada para obtenção do título  
de Mestra em Ciências. Área de concentração:  
Ciência Animal e Pastagens

**Piracicaba**  
**2018**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Lopes, Sara de Oliveira Romeiro

Planejamento e execução de adubações nitrogenadas em pastagens em sistemas de produção de gado de corte no Estado de São Paulo / Sara de Oliveira Romeiro Lopes. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

52 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Nitrogênio 2. APSIM 3. Eficiência de utilização de nitrogênio 4. Adubação 5. Critério temperatura I. Título

***Ofereço***

*A meus pais Isaiás e Marta que me apoiaram nas decisões mais difíceis na minha vida sempre acreditando em mim. Meu amado esposo Edeandro, pelo apoio, amor, broncas e incentivos. Aos meus sobrinhos, meu irmão, foi difícil ficar longe de todos, mas com o amor e apoio de todos consegui chegar até aqui. Vocês foram essenciais para poder chegar até aqui.*

A minha querida vizinha Onofra (*in memoriam*) e a minha querida irmã Sandra (*in memoriam*) que sempre estarão no meu coração, sempre me deram muita amor e apoio, mas que infelizmente não puderam estar fisicamente comigo nessa etapa final.  
Saudade imensa, amo vocês.

**Dedico.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo folego de vida, pelas oportunidades oferecidas e pela realização de muitos sonhos.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e a Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal e Pastagens pela oportunidade de realização do curso.

Agradeço a minha orientadora Dra. Patrícia Menezes Santos, pela orientação, motivação pelas palavras de sabedoria nos momentos mais desesperadores (pelo menos para mim), meu muito obrigado.

Ao Pesquisador José Ricardo Pezzopane da Embrapa Pecuária Sudeste pelo apoio e paciência no auxílio com a elaboração dos dados.

Aos estagiários da Embrapa Pecuária Sudeste do Laboratório de Estudos Agroambientais pelo apoio, companheirismo e distrações quando possível e aos alunos da pós-graduação Valéria, Cristian e Henrique pelo ajuda quando precisei.

Aos amigos que fiz em Piracicaba e São Carlos, em especial a Republica Sem Nome no qual conheci meninas especiais que ficarão no meu coração: Maki, Júlia, Jubelu, Marcela, Camila, Bianca, Tatiene, Mari e Junks vocês foram minha família nesse tempo que fiquei em São Carlos.

Aos meus familiares que mesmo a distância sempre me apoiaram e acreditaram em mim.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	11
2.1. <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu .....	11
2.2. Nitrogênio no Solo .....	12
2.3. Nitrogênio na planta .....	15
2.4. Eficiência de uso do fertilizante nitrogenado .....	16
2.5. Modelos Matemáticos .....	18
3. HIPÓTESES .....	21
4. OBJETIVOS .....	23
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
5.1. Teste do APSIM <i>Tropical Forage</i> para estimativa de eficiência de uso de nitrogênio.....	25
5.2. Parâmetros de temperatura .....	27
5.3. Parâmetros de disponibilidade de água no solo.....	28
5.4. Recomendação de época de adubação.....	28
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	31
6.1. Simulação de resposta à adubação nitrogenada pelo modelo APSIM .....	31
6.2. Temperatura e expectativa de resposta à adubação nitrogenada .....	35
6.3. Disponibilidade de água e expectativa de resposta à adubação nitrogenada.....	37
6.4. Época recomendada para adubação de pastagens em cidades do Estado de São Paulo .....	38
7. CONCLUSÃO.....	45
REFERENCIAS.....	47

## RESUMO

### **Planejamento e execução de adubações nitrogenadas em pastagens em sistemas de produção de gado de corte no Estado de São Paulo**

O suprimento inadequado de nutrientes em pastagem influencia diretamente na produtividade da planta. A eficiência de utilização de nitrogênio (EUN) é definida como a quantidade em kg de MS produzida por kg de nitrogênio aplicado. A EUN é influenciada por fatores de temperatura e disponibilidade hídrica. O objetivo geral do trabalho foi definir critérios agroclimáticos para recomendação de épocas para adubação nitrogenada de *Urochloa brizantha* cv. Marandu na região de São Paulo. Com base na literatura foram definidas três classes de expectativa de resposta à adubação: alta, moderada e baixa. Estas classes foram relacionadas a critérios térmicos e hídrico, definidos a partir de dados de literatura e de modelagem matemática. O modelo APSIM (Agricultural Production System Simular) foi utilizado para estimar a eficiência de uso de N em quatro cidades do Estado de São Paulo com climas contrastantes. Em seguida, os dados foram relacionados à temperatura média diária e foram definidos os critérios térmicos relacionados à expectativa de resposta à adubação. A relação entre armazenamento relativo de água e produção relativa de *Urochloa brizantha* cv. Marandu, obtida a partir de dados de literatura, foi utilizada para definição dos critérios hídricos. A adubação nitrogenada em cada período foi classificada em “recomendada” ou “não recomendada”, a partir da combinação entre os critérios de disponibilidade de água e temperatura. Os dados de armazenamento relativo de água no solo e temperatura média de Itapetininga, São Carlos, São José do Rio Preto e Araçatuba foram submetidos à análise estatística descritiva. Os períodos nos quais havia probabilidade igual ou superior a 80% de ocorrer a condição “recomendada” foram considerados adequados para adubação nitrogenada. A expectativa de resposta à adubação foi considerada alta quando a temperatura média do período era superior a 21,6°C, moderada quando a temperatura média era entre 16,7 e 21,6°C e baixa quando a temperatura média era inferior a 16,7°C. Em relação ao critério hídrico, a expectativa de resposta à adubação foi considerada alta quando o armazenamento relativo de água era superior a 0,82, moderada entre 0,82 e 0,62 e baixa quando o armazenamento era inferior a 0,62. As épocas para adubação nitrogenada foram diferentes nas cidades em estudo devido a diferenças climáticas entre elas. De dezembro a março foram os meses recomendados para adubação em Araçatuba, outubro a fevereiro para Itapetininga. Em São José do Rio Preto a adubação nitrogenada deve ser recomendada a partir de dezembro. Entre março e abril, o risco associado ao critério hídrico é um pouco mais elevado, voltando a diminuir em maio. Entre junho e novembro a adubação nitrogenada não é recomendada em São José do Rio Preto. Em São Carlos a melhor época para adubação nitrogenada é de novembro a maio. Modelo APSIM não simulou adequadamente a produtividade de *Urochloa brizantha* cv. Marandu, principalmente em sistema sem adição de nitrogênio. A definição de critério relacionados a temperatura e disponibilidade de água possibilitou a identificação de épocas para recomendação de adubação nitrogenada em função da expectativa de resposta de *Urochloa brizantha* cv. Marandu visando as maiores eficiências de utilização de nitrogênio e sustentabilidade dos sistemas de produção animal

Palavras-chave: Nitrogênio; APSIM; Eficiência de utilização de nitrogênio; Adubação; Critério temperatura; *Urochloa brizantha*; Critério hídrico

## ABSTRACT

### **Planning and execution of nitrogen fertilization in pastures in systems of beef cattle production in the State of São Paulo**

Inadequate grazing nutrient supply directly influences plant productivity. The nitrogen utilization efficiency (EUN) is defined as the amount in kg of DM produced per kg of nitrogen applied. EUN is influenced by temperature factors and water availability. The general objective of the work was to define agroclimatic criteria for the recommendation of nitrogen fertilization periods of *Urochloa brizantha* cv. Marandu in the region of São Paulo. Based on the literature, three classes of expectation of response to fertilization were defined: high, moderate and low. These classes were related to thermal and water criteria, defined from literature data and mathematical modeling. The APSIM (Agricultural Production System Simulate) model was used to estimate the efficiency of N use in four cities of the State of São Paulo with contrasting climates. The data were then related to the average daily temperature and the thermal criteria related to the expected response to fertilization were defined. The relationship between relative water storage and relative yield of *Urochloa brizantha* cv. Marandu, obtained from literature data, was used to define the water criteria. Nitrogen fertilization in each period was classified as "recommended" or "not recommended", based on the combination of water and temperature availability criteria. The data of relative water storage in the soil and average temperature of Itapetininga, São Carlos, São José do Rio Preto and Araçatuba were submitted to descriptive statistical analysis. The periods in which there was a probability equal to or greater than 80% of the "recommended" condition were considered adequate for nitrogen fertilization. The expected response to fertilization was considered high when the mean temperature of the period was higher than 21.6°C, moderate when the average temperature was between 16.7 and 21.6°C and low when the average temperature was below 16.7°C. Regarding the water criterion, the expectation of response to fertilization was considered high when the relative water storage was higher than 0.82, moderate between 0.82 and 0.62 and low when storage was less than 0.62. The seasons for nitrogen fertilization were different in the cities under study due to climatic differences between them. From December to March were the months recommended for fertilization in Araçatuba, October to February for Itapetininga. In São José do Rio Preto nitrogen fertilization should be recommended as of December. Between March and April, the risk associated with the water criterion is slightly higher, decreasing again in May. Between June and November nitrogen fertilization is not recommended in São José do Rio Preto. In São Carlos, the best season for nitrogen fertilization is from November to May. Model APSIM did not adequately simulate the productivity of *Urochloa brizantha* cv. Marandu, mainly in system without addition of nitrogen. The definition of criteria related to water temperature and availability made it possible to identify times for nitrogen fertilization recommendation as a function of the expected response of *Urochloa brizantha* cv. Marandu aiming at greater nitrogen utilization and sustainability efficiencies of animal production systems.

Keywords: Nitrogen; APSIM; Efficiency of nitrogen utilization; Fertilizing; Temperature criterion; *Urochloa brizantha*; Water criterion



## 1. INTRODUÇÃO

O aumento na demanda por alimentos e a pressão pelo uso da terra tem impulsionado mudanças na pecuária brasileira. No período de 1950 a 2006, a produção de carne bovina aumentou cerca de seis vezes, tornando o país um dos maiores produtores mundiais (MARTHA JUNIOR, 2012). Até a década de 70, a expansão da fronteira agrícola foi o principal fator de aumento da produção de carne bovina do país (MARTHA JUNIOR, 2012). A partir de 1975, no entanto, o aumento de produção passou a ser explicado principalmente pelos aumentos de produtividade, que refletiram aumentos na taxa de lotação animal das pastagens e no ganho de peso individual dos bovinos, decorrentes da adoção de tecnologias pelos produtores (MARTHA JUNIOR, 2012).

A fertilidade do solo e a disponibilidade de nutrientes interferem diretamente no crescimento das plantas e na produtividade das pastagens, sendo que a reposição insuficiente de nutrientes é apontada como uma das causas de degradação de pastagens no Brasil. Ao longo dos anos, estudos sobre nutrição mineral de plantas e sobre fertilidade e adubação dos solos embasaram recomendações técnicas. Tabelas de adubação para forrageiras podem ser encontradas no Boletim 100 do Instituto Agrônomo de Campinas (WERNER et al., 1997), e nas recomendações organizadas pela Comissão de fertilidade do solo de Minas Gerais (CANTARUTTI et al., 1999) e pela Embrapa Cerrados (VILELA et al., 2002).

Dos nutrientes considerados essenciais ao desenvolvimento das plantas, o nitrogênio é um dos que promove maiores aumentos de produção em áreas de pastagem já formadas no Brasil. Apesar disso, o uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados eleva o custo de produção e pode causar danos ao ambiente (acidificação do solo, liberação de gases do efeito estufa, eutroficação de lagoas e açudes) e à saúde humana (contaminação de mananciais hídricos por nitrato).

A resposta das plantas forrageiras à adubação nitrogenada depende de fatores tais como: espécie forrageira, condições ambientais (temperatura, umidade do solo, ocorrência de chuva), fertilidade do solo, fonte, dose e parcelamento de dose de N, etc. A eficiência de uso do N-fertilizante, corresponde, em média, 26 kg MS por kg de N, podendo atingir valores de 83 kg MS por kg de N (SANTOS & MONTEIRO, 2003; LUGÃO et al., 2003; MARTHA JUNIOR, 2004).

O zoneamento agroclimático permite, a partir de conhecimentos de variáveis climáticas como temperatura, precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência, escolher a melhor época para planejamento de atividades agrícolas. O zoneamento

agroclimático da época de adubação nitrogenada em pastagens pode contribuir para a gestão de riscos e para aumentar a eficiência de uso do N-fertilizante nos sistemas de produção, com impactos econômicos e ambientais positivos. O objetivo deste trabalho foi definir critérios para o zoneamento agroclimático da época de adubação em pastagens de *Urochloa brizantha* cv. Marandu no Estado de São Paulo.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. *Urochloa brizantha* cv. Marandu

O capim Marandu (*Urochloa brizantha* cv. Marandu) é originária da estação experimental de forrageiras de Marandellas, no Zimbábue, na África, localizada em uma região onde os solos apresentam bons níveis de fertilidade, com precipitação próxima a 700 mm, e cerca de 8 meses de seca no inverno (RAYAMN, 1983). Introduzida no Brasil por volta de 1967, foi lançada em 1984 como uma alternativa de capim resistente a cigarrinha (*Deois incompleta*) em pastagens do Brasil, após avaliação pelo programa de melhoramento de plantas forrageiras da Embrapa (NUNES et al., 1984).

Dez anos depois do seu lançamento, o cultivar marandu ocupava cerca de 50% dos 80% de pastagens cultivadas ocupadas pelo gênero *Urochloa* na região do Brasil Central (SANTOS FILHO, 1996), contribuindo para aumento da taxa de lotação das pastagens Brasileiras (IBGE, 2007).

O capim Marandu é uma “planta cespitosa, muito robusta, de 1,5 a 2,5 m de altura, com colmos iniciais prostrados, mas produzindo afillhos predominantemente eretos. Rizomas muito curtos e encurvados. Colmos floríferos eretos, frequentemente com afillhamento nos nós superiores, que leva à proliferação de inflorescências, especialmente sob-regime de corte ou pastejo, bainhas pilosas e com cílios nas margens, geralmente mais longas que os entre-nós, escondendo os nós, o que confere a impressão de haver densa pilosidade nos colmos vegetativos. Lâminas foliares linear-lanceoladas, esparsamente pilosas na face ventral e glabras na face dorsal. Inflorescências de até 40 cm de comprimento, geralmente com 4 a 6 rácermos, bastante equidistantes ao longo do eixo, medindo de 7 a 10 cm de comprimento, mas podendo alcançar 20 cm nas plantas muito vigorosas. Espiguetas unisseriadas ao longo da raque, oblongas a elíptico-oblongas, com 5 a 5,5 mm de comprimento por 2 a 2,5 mm de largura, esparsamente pilosas no ápice” (VALLS & SENDULSKY, 1984).

O capim Marandu é resistente às cigarrinhas *Zulia entreriana* (Berg), *Deois flavopicta* (Stal) e *Deois schach* (Fab) (SOARES FILHO, 1994). É tolerante ao frio e à seca, sendo capaz de resistir 3-6 meses de estiagem, e é recomendado para áreas de fertilidade do solo de moderada a alta, com elevado potencial de resposta á adubação nitrogenada (FAO, 2004). É recomendada para regiões com mínimo de 1000 mm de chuva anual, porém apresenta baixa tolerância a solos úmidos e, em lugares sujeitos a alagamento temporário, foi acometida da “síndrome da morte súbita”, que é caracterizada pelo amarelecimento das folhas devido à alta

umidade do solo tornando-se susceptível a ataques de fungos e a morte da planta (SOARES FILHO, 1994; ANDRADE & VALENTIM, 2007).

## 2.2. Nitrogênio no Solo

Aproximadamente 95% do N encontrado no solo estão na forma orgânica, não sendo possível a assimilação pelas plantas, o restante se encontra na forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), que são formas assimiláveis pelas plantas e microrganismos. Entradas e saídas de N no sistema de pastagem podem ocorrer via as excreta de animais, adição de fertilizantes nitrogenados, fixação simbiótica e não simbióticas de  $\text{N}_2$ , decomposição da matéria orgânica, processos de mineralização, imobilização, desnitrificação, lixiviação e volatilização da amônia (TAIZ & ZEIGER, 2013).

O nitrogênio no solo tem alta mobilidade, chegando até as raízes principalmente via fluxo de massa (é o movimento total da água que ocorre em resposta á diferença gradiente de pressão) (TAIZ & ZEIGER, 2013). O  $\text{NH}_4^+$ , na sua forma iônica, se mantém adsorvido no solo pelas cargas negativas por ser um cátion, enquanto que  $\text{NO}_3^-$  não é adsorvido, encontrando-se livre na solução do solo, portanto suscetível ao processo de lixiviação (MARSCHNER, 1995).

Na decomposição da matéria orgânica (M.O), o N-orgânico é quebrado em partes menores por enzimas extracelulares presente no solo, em seguida essas partes menores passam por diversos processos de transformação, iniciando a mineralização, que é a conversão de N-orgânico em N-inorgânico por microrganismos heterotróficos, aeróbios e anaeróbios, que utilizam resíduos vegetais como fonte de carbono e energia. Quanto maior o processo de mineralização do solo, menor a necessidade de adubação nitrogenada para garantir uma determinada produtividade, pois o processo de mineralização é responsável pelo aumento de N-mineral no solo. Em sistemas de produção sem adubação nitrogenada a mineralização da MO é essencial, pois fornece N-mineral para as plantas (MARTHA JUNIOR et al., 2004). Nitrificação é definida como a oxidação de amônio a nitrato, mediada por microrganismos quimilitotróficos ou quimiorganotróficos e envolve duas etapas: a nitrificação, que é a transformação de amônio a nitrito realizado pelas bactérias do gênero *Nitrossomonas*; e a nitratação, na qual ocorre a transformação do nitrito a nitrato pelas bactérias do gênero *Nitrobacter* (VICTORIA et al., 1992).

A redução assimilatória do nitrato (imobilização) é o processo em que ocorre a transformação do N-inorgânico em N-orgânico. O amônio é assimilado pelos microrganismos por duas vias a desidrogenase do glutamato (GDH) e a sintetase da glutamina-sintetase do

glutamato (GS/GOGAT). A primeira via é ativa na presença de altas concentrações de amônio no solo para formação de glutamato e a segunda ocorre em maior frequência em condições de baixas concentrações de amônio no solo (VIEIRA, 2017).

A predominância dos processos de transformação do N é influenciada por diversos fatores como: precipitação pluviométrica, temperatura e relação C/N. Temperaturas na faixa de 26 a 32°C são favoráveis ao processo de nitrificação (MARTHA JUNIOR et al., 2004). A relação C/N determina a velocidade da decomposição da matéria orgânica do solo, influenciando na predominância dos processos de transformações de N, mineralização ou imobilização (MARTHA JUNIOR et al., 2004). Os microrganismos utilizam o carbono como combustível para gerar energia enquanto que o nitrogênio é um elemento principal para seu crescimento.

Quanto maior a relação C/N menor a velocidade de decomposição predominando o processo de imobilização. Quando a relação C/N esta por volta de 20-30/1 há um equilíbrio entre os processos de imobilização e mineralização. Quando a relação C/N é menor que 20/1 ocorre predominância dos processos de mineralização sendo a velocidade de decomposição mais rápida (MARTHA JUNIOR et al., 2004). Umidade do solo na faixa de 50-60% da capacidade de campo pode favorecer os processos de mineralização, e a diminuição de oxigênio nos espaços porosos do solo proporciona condições ideais para os processos de desnitrificação (DOBBIE & SMITH, 2001).

A incorporação do fertilizante ao solo a uma profundidade de 5 cm é uma alternativa para diminuição das perdas por volatilização. Urquiaga (2000) aponta que na incorporação a 2,5 cm de profundidade, as perdas por volatilização diminuíram pela metade. Porém, no que diz respeito às pastagens implantadas, a incorporação de N por meio de máquinas não é recomendada, por afetar a estrutura da planta e prejudicar a rebrota e o sistema radicular (CORSI & NUSSIO, 1992).

A lixiviação do nitrato refere-se à descida do mesmo no perfil do solo, além da profundidade em que as raízes possam alcançá-lo, podendo, em certos casos, atingir o lençol freático. Essa perda é decorrente do processo de nitrificação, visto que o nitrato não é adsorvido nos colóides devido suas cargas negativas e fica na solução do solo passível de lixiviação (VIEIRA, 2017). Nas condições brasileiras, há poucos relatos de lixiviação de nitrato na literatura. Em pastagens tropicais bem manejadas as perdas de N por lixiviação aparentemente não são problemas, estudos indicam que menos de 5% do N aplicado é lixiviado para camadas de solo superiores a 30 cm de profundidade, bem como perdas por

erosão e escoamento superficial são pequenas e regularmente não ultrapassam 5 kg/ha de N (MARTHA JUNIOR, 1999; OLIVEIRA, 2001; RUSSELLE, 1996).

Dentre os fertilizantes mais utilizados no Brasil estão a ureia, sulfato de amônio e o nitrato de amônio. A ureia ( $\text{CO}((\text{NH}_2)_2)$ ) apresenta 44-46% de N na forma amidica em sua composição, tem como vantagem a baixa corrosividade, compatibilidade de diversos outros fertilizantes e defensivos e a alta solubilidade em água, entretanto apresenta maior perda por volatilização. O sulfato de amônio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) contem 23% de N e 23% de enxofre em sua composição. Apesar do custo mais elevado do sulfato de amônio e do seu elevado potencial de acidificação do solo, o fertilizante apresenta menores perdas por volatilização e o enxofre pode melhorar a eficiência de uso do N. O nitrato de amônio com 34% N, metade na forma nítrica e metade na forma amoniacal, é o terceiro mais utilizado no Brasil, possui menores perdas por volatilização e menor potencial de acidificação do solo.

A amônia é continuamente formada no solo por degradação biológica de fertilizantes e compostos orgânicos, e as perdas por volatilização são afetadas pelo tipo de solo, manejo e condições climáticas, principalmente temperatura e precipitação pluviométrica.

Em relação às perdas por volatilização, quando aplicada em superfície, a ureia é rapidamente hidrolisada pela urease, formando carbonato de amônio, que se decompõe rapidamente originando amônio, bicarbonato e hidroxila. Durante a hidrólise da ureia, verifica-se o aumento localizado do pH do solo, pois íons de hidrogênio são consumidos, alterando o equilíbrio entre amônio e amônia. A volatilização da amônia tem maior potencial de ocorrência quanto maior for o pH na zona de aplicação (VIEIRA, 2017).

A volatilização da amônia é maior em altas temperaturas, devido à atividade da urease, e quando a umidade de solo ou a precipitação pluviométrica não proporcionam a movimentação do adubo para as camadas mais profundas após sua aplicação (MARTHA JUNIOR, 2003). Utilizando N-ureia aplicado em superfície, Lara Cabezas et al. (2000) e Lara Cabezas et al. (1997), mostram perdas de 40-80% de N aplicado, em estudo com cana de açúcar e citros. Primavesi et al. (2001) em estudo com doses de 100 kg de N/ha/ano verificaram que, com precipitação pluviométrica em torno de 10 mm logo após a aplicação de N, houve perdas por volatilização inferiores a 17%; já em áreas tratadas com a mesma dose observaram perdas por volta de 21% quando não ocorreram chuvas logo após a aplicação do fertilizante.

Para conferir condições para o desenvolvimento da planta forrageira e evitar a degradação das pastagens tropicais, a recomendação mínima para adubação nitrogenada é 50 kg N ha/ano (WERNER et al., 1996; CANTARUTTI et al., 1999)., Euclides (2007) observou

que pastagens que receberam 50 kg N ha/ano de adubação nitrogenada conseguiram manter a produtividade até o terceiro ano, no quarto ano houve necessidade de aumento da dose de N para 100 kg ha/ano. Em sistemas nos quais não há essa reposição do nutriente, a produtividade decresce a cada ano, não conseguindo sustentar a produtividade.

A dose de N a ser aplicada em pastagens é estimada em função da expectativa de taxa de lotação em uma determinada área (SANTOS et al., 2007). As recomendações de doses variam de 50 a 500 kg de N ha/ano, com parcelamento da aplicação para as doses acima de 100 kg de N ha/ano (MARTHA JUNIOR et al., 2007)

O entendimento das reações do nitrogênio no solo e na planta é essencial para tomada de decisões que interferem na produtividade e na eficiência de uso do nutriente no sistema. Doses, fontes, parcelamento, irrigação ou aplicação de N próximo aos dias com chuvas são algumas alternativas para melhora eficiência de utilização do fertilizante pela planta e, consequentemente, aumentar a sustentabilidade do sistema de produção.

### **2.3. Nitrogênio na planta**

O N é constituinte de diversos componentes orgânicos na planta como proteínas, aminoácidos, ácidos nucleicos, bases nitrogenadas e outros. O N na planta é dividido em estrutural, que está associado à parede celular e aos ácidos nucleicos; N metabólico ativo, que é representado pelas enzimas e responde ao aumento de N ocasionando incrementos na taxa fotossintética e no crescimento vegetal; e N componentes de reservas, que corresponde ao N armazenado na forma de nitrato ( $\text{NO}_3$ ) e amidas quando o suprimento excede as necessidades da planta (MENGEL & KIRKBY, 2001).

O conteúdo de água no solo é importante, pois é através da solução do solo que as raízes absorvem os nutrientes necessários para seu desenvolvimento e essa absorção de água é diretamente influenciada pela transpiração. O fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera é regulado pela abertura estomática, por sua vez, realiza a função de absorção de  $\text{CO}_2$  com a perda de água na forma de vapor (transpiração), sendo esta perda mais expressiva em função do maior gradiente de vapor d'água entre a atmosfera externa e a folha. Quando não há suprimento hídrico suficiente no solo os estômatos abrem em menor frequência ou até mesmo permanecerão fechados para diminuição de perda de água evitando sua desidratação (TAIZ & ZEIGER, 2013).

O processo de absorção de amônio para o interior da célula da raiz é por meio passivo, onde o nutriente caminha a favor de um gradiente de concentração, sem a necessidade de

gasto de energia. Ao passo que a absorção do nitrato é por via ativa, onde há gasto de energia metabólica, pois o nutriente caminha de uma região de menor concentração para uma de maior concentração, ou seja, contra um gradiente de concentração (TAIZ & ZEIGER, 2013). No interior da célula da raiz o amônio é incorporado a aminoácidos, enquanto o nitrato precisa ser transformado em amônio para que possa ser incorporado aos aminoácidos, implicando em maior gasto de energia (MONTEIRO, 2004).

Tanto o amônio quanto o nitrato entram na célula das raízes através de transportadores específicos. O nitrato pode ser acumulado no vacúolo ou reduzido a nitrito pela ação da enzima redutase do nitrato (RN), em seguida o nitrato entra no plastídio onde é convertido a amônio pela ação da enzima redutase do nitrito (RNi), que necessita de um agente doador de elétrons, a ferredoxina (FER). As enzimas sintetase da glutamina (GLN) e sintetase do glutamato (GOGAT) incorporam o amônio aos aminoácidos, formando glutamina (GLN) e glutamato (GLU), respectivamente (BREDEMEIER & MUNDSTOCK, 2000).

O amônio e o nitrato podem ser transportados inalterados para a parte aérea da planta. Nas folhas ocorrem os mesmos processos de redução do nitrato, porém a incorporação do amônio a aminoácidos ocorre no cloroplasto da célula e o nitrato também pode ser acumulado no vacúolo da célula (BREDEMEIER & MUNDSTOCK, 2000). A maior absorção de uma forma ou outra depende de fatores como disponibilidade das mesmas, características da planta, pH, teor de carboidratos nas raízes, e de temperatura (ELGHARABLY & MARSCHNER, 2010; MARSCHNER, 1995).

Quando a planta esta em deficiência de nitrogênio, a redistribuição do elemento na forma de aminoácidos se dá pelo floema, sendo o nutriente mobilizado das partes mais velhas para as partes mais novas, promovendo a clorose das folhas mais velhas devido à redução do teor de clorofila (MENGEL & KIRKBY, 2001; TAIZ & ZEIGER, 2013).

#### **2.4. Eficiência de uso do fertilizante nitrogenado**

A eficiência agronômica do N aplicado (EA) ou eficiência do uso de nitrogênio (EUN) refere-se à produção adicional de matéria seca (parte aérea) nas áreas adubadas em relação às áreas não adubadas por unidade de nitrogênio aplicado, em kg de MS / kg N aplicado (FAGERIA, 1998):

$$EUN = \frac{\text{Produção MS com adubação (kg)} - \text{Produção MS sem adubação (kg)}}{\text{Dose de N aplicado (kg)}}$$

O manejo inadequado da adubação nitrogenada faz com que o N-fertilizante seja utilizado de forma ineficiente, acarretando em perdas significativas do nutriente e em aumento pouco significativo na produtividade e qualidade da forragem (MARTHA JUNIOR et al., 2004; MARTHA JUNIOR et al., 1999; PRIMAVESI et al., 2001).

Martha Junior et al. (2004) em um levantamento sobre a EUN em 382 observações encontraram valores médios 26 kg de MS/kg de N aplicado sendo as maiores eficiências observadas com doses de até 150 kg de N/ha/ano. Entretanto, segundo o autor, vale ressaltar que 62% das observações sobre eficiência de uso do N estavam na faixa de 15 a 45 kg de MS/kg N aplicado, sendo que essa amplitude pode ser atribuída a fatores relacionados às espécies forrageiras, ao solo, aos fatores ambientais, e ao manejo da pastagem, que afetam o desempenho da planta forrageira. Para que a eficiência de uso de nitrogênio seja elevada, é fundamental que as condições ambientais sejam favoráveis ao desenvolvimento das plantas. A disponibilidade hídrica e a temperatura são os principais fatores climáticos que influenciam a produtividade das plantas forrageiras (PEZZOPANE et al., 2012; CRUZ, 2010; ARAUJO, 2011).

A água possui diversas funções vitais na planta, como crescimento e expansão celular, abertura e fechamento de estômatos, deslocamento e transportes de solutos, fotossíntese e respiração e outros (TAIZ & ZEIGER, 2013). Estima-se que para cada grama de matéria seca produzida, cerca de 500g de água são absorvidos pelas raízes, sendo que 95% é perdida pelo processo de transpiração e o restante utilizado no metabolismo e crescimento vegetal, podendo um pequeno desequilíbrio nesse fluxo causar déficit hídrico e desencadear funcionamento inadequado de inúmeros processos a nível celular (TAIZ & ZEIGER, 2013).

O efeito da disponibilidade hídrica sobre o desenvolvimento de forrageiras tropicais pode ser explorado por meio da correlação entre o armazenamento relativo de água (armazenamento atual/armazenamento máximo) ou a relação ETR/ETP (evapotranspiração real/ evapotranspiração potencial) e a produção relativa de forragem (PEZZOPANE et al., 2013). Pezzopane et al. (2018) e Pezzopane et al. (2013) observaram que valores acima de 0,82 e 0,75 de armazenamento relativo de água não implicavam em redução de produção em *capim Marandu* e em *capim Mombaça (Megathyrsus maximus)*, respectivamente. Pezzopane et al. (2013), verificaram ainda que a produção relativa de *capim Mombaça* também não era afetada quando a relação ETR/ETP era igual ou superior a 0,97.

O efeito da temperatura sobre o desenvolvimento das forrageiras tropicais pode ser descrito por meios das temperaturas cardinais: temperatura base inferior, primeiro ótimo, segundo ótimo e temperatura base superior. McWillin (1978) definiu que a temperatura base

(TB) como aquela em que a temperatura limita o acúmulo de massa de uma espécie tornando-se “nulo” ou “desprezível”. Desta forma, denomina-se de temperatura base inferior e superior temperaturas mínimas e máximas que limitam o crescimento das plantas, respectivamente. Há pouca informação no que se refere à temperatura base superior de gramíneas tropicais, e acredita-se que este limite não seja normalmente alcançado nas principais regiões de cultivo. Entretanto, nas regiões de maior altitude e latitude, o limite inferior de temperatura é usualmente atingido em períodos específicos do ano (inverno agrostológico- maio a setembro), e tem sido investigado para várias forrageiras tropicais. Em trabalhos com *Urochloa brizantha* cv. Marandu Cruz et al. (2011), Lara (2007), Mendonça e Rassini (2006), Silva et al. (2012), Pequeno et al. (2014) e Pezzopane et al. (2018) encontraram valores de T<sub>bi</sub> de 17,2; 17,1, 15,0; 10,5; 11,1; e 10,6°C, respectivamente.

Pedreira et al. (2011), após otimizar os parâmetros modelo CROPGRO Perennial Forage para *Urochloa brizantha* cv. Xaraés definiu os seguintes valores para as temperaturas base inferior, primeiro ótimo, segundo ótimo e base superior: 10,0; 32,0; 40,0; e 45,0 °C. Já Pequeno et al. (2014), após ajustes do modelo CROPGRO Perennial Forage, definiu os seguintes parâmetros de temperatura para *Urochloa brizantha* cv. Marandu: 11,1; 30,2; 40,0; e 45,0 °C para as temperaturas base inferior, primeiro ótimo, segundo ótimo e base superior, respectivamente. Devido a diversas metodologias utilizadas para a determinação das temperaturas bases, ocorrem amplitudes de temperaturas encontradas para os diversos cultivares dificultando a determinação de temperatura para uma determinada espécie ou cultivar.

## 2.5. Modelos Matemáticos

A utilização de modelos matemáticos de simulação advém de uma área de conhecimento denominada análise de sistemas. Os modelos matemáticos de simulação correspondem a uma série de algoritmos que explicam um sistema, possibilitando a organização dos atributos de interesse de forma a simplificar a realidade e, ao mesmo tempo, permitir que diversos atributos sejam combinados criando cenários simulados (JAME & CUTFORTH, 1996). Os modelos matemáticos são divididos em mecanicistas, que consideram o conhecimento sobre os processos físicos, químicos e biológicos que governam o fenômeno em estudo, e empíricos, que oferecem pouco ou nenhum entendimento sobre os processos envolvidos. Alguns modelos empíricos para estimativa de acúmulo de biomassa de *Megathyrus maximus* e *Urochoa brizantha* a partir de variáveis agrometeorológicas foram

desenvolvidos por técnicas de regressão linear nos últimos anos 90, porém a maior parte dos estudos foi conduzida em poucas regiões, o que limita a sua aplicação para locais com características ambientais diferentes (ANDRADE et al., 2015). Alguns modelos empíricos também foram desenvolvidos com o objetivo de prever a produção de forragem a partir da disponibilidade de N (OVERMAN & ANGLE, 1986; OVERMAN et al., 1988; ALMEIDA et al., 2011). Almeida et al. (2011) associou a variável unidades fototérmicas com a adubação nitrogenada e a disponibilidade de água para prever o acúmulo de biomassa de *Megathyrus maximus* cv. Tanzânia. O estudo de Almeida et al. (2011), no entanto, foi baseado em dados coletados em ambiente protegido em um único local, havendo necessidade de parametrização e avaliação do modelo com dados de campo antes de sua aplicação aos sistemas de produção.

Os modelos mecanicistas disponíveis para simular produção de forrageiras tropicais foram inicialmente desenvolvidos em países de clima temperado e depois adaptados às condições brasileiras (TONATO, 2010). Os modelos CROPGRO CROPGRO Perennial Forage modelo da plataforma DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) (BOOT et al., 1998), e modelo APSIM *Tropical Pasture*, originários de regiões temperadas, foram adaptados para simular crescimento de algumas espécies de forrageiras utilizadas no Brasil como *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Urochloa brizantha* cv. Piatã (LARA et al., 2012; ARAUJO et al., 2013; PEQUENO, 2014; BOSI, 2017).



### **3. HIPÓTESES**

Melhor época para aplicação de fertilizante nitrogenado, de forma a favorecer a eficiência de uso de nitrogênio, pode ser definida a partir de critérios de temperatura e disponibilidade de água.



#### 4. OBJETIVOS

- Definir critérios relacionados ao clima para gestão de risco e aumento da eficiência da adubação nitrogenada;
- Identificar, para cidades do Estado de São Paulo com clima contrastante, períodos com maior probabilidade da adubação nitrogenada ser feita em condições climáticas favoráveis;



## 5. MATERIAL E MÉTODOS

Para definir critérios térmicos para o zoneamento agroclimático da época de adubação em pastagens de capim-marandu foram feitas simulações com o modelo *APSIM Tropical Pasture*. O acúmulo de biomassa e a eficiência de uso do nitrogênio foram estimados para quatro cidades com climas contrastantes no Estado de São Paulo, e depois relacionados à temperatura média do local, considerando três classes de eficiência de uso de nitrogênio: baixa (<15 kg MS/kg N), moderada (15 a 45 kg MS/kg N); e alta (>45 kg MS/kg N) (MARTHA JUNIOR et al. 2004). Os critérios hídricos para o zoneamento de época de adubação do capim-marandu foram adaptados a partir de dados de literatura que relacionavam a produção da planta à disponibilidade de água (PEZZOPANE et al., 2018). A recomendação de época para adubação nitrogenada foi definida a partir da combinação dos critérios térmico e hídrico.

### 5.1. Teste do *APSIM Tropical Forage* para estimativa de eficiência de uso de nitrogênio

Os dados utilizados no teste do modelo *APSIM Tropical Forage* foram gerados em dois experimentos de campo, realizados em São Carlos/SP. Utilizou-se *Urochloa brizantha* cv. Marandu cultivado em condições de sequeiro e irrigado na área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, localizada no município de São Carlos/ São Paulo, Brasil, (22° 0' 55" Sul, 47° 53' 28" Oeste). O clima é classificado segundo Köppen, como Cwa, verão úmido e inverno seco. Histórico de temperaturas máxima, mínima e média do ar e precipitação acumulado total (2009-2011) de 27,1; 15,9; 21,5°C e 1356 mm respectivamente (Embrapa Pecuária Sudeste 2011). O solo do local foi classificação como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, com textura média, conforme Embrapa (1999).

Foram utilizadas 12 parcelas irrigadas, destas 6 eram adubadas com 550 kg/ha/ano de N e 6 sem adubação de nitrogênio, cada parcela com 4x8m (32 m<sup>2</sup>). Ao final de cada ciclo de avaliação (28 dias no período das águas e 42 dias no período seco), as parcelas eram cortadas a altura de 0,15 cm. Amostras de 0,5 m<sup>2</sup> foram coletadas a cada ciclo para estimativa do acúmulo de forragem. Para cada amostra de forragem foram retiradas sub-amostras, nas quais foram pesadas e levadas à estufa de circulação de ar forçada a 55°C por 72 horas para a determinação da matéria seca (MS). A taxa de acúmulo diário de forragem (TAF) por estação foi calculado a partir do somatório do TAF dos ciclos dentro de cada estação dividido pelo número de dias de cada estação avaliada. (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização dos ciclos de crescimento avaliados em São Carlos/SP, data dos ciclos, dia de descanso, taxa de acúmulos os tratamento avaliados, temperaturas mínima, máxima e média, e precipitação no ano de 2015 e 2016.

	Duração do Ciclo			Taxa acúmulo (kg MS/ha/dia)				Clima				
	Ciclo	Início	Fim	Dias	Irrigado 550	Irrigado 0N	Sequeiro 550N	Sequeiro 0N	Tmin °C	Tmax °C	Tmed °C	Pre (mm)
Outono	1	14/05/2015	18/06/2015	35	19,70	24,79	10,96	12,12	14,3	25,5	19,9	44
Inverno	2	18/06/2015	30/07/2015	42	35,00	33,79	19,63	16,71	13,2	24,6	18,9	69,4
Inverno	3	30/07/2015	10/09/2015	42	64,51	67,93	52,58	45,04	13,6	27,9	20,7	102,6
Primavera	4	10/09/2015	22/10/2015	42	35,58	16,96	7,94	4,92	17,4	31,3	24,4	119
Primavera	5	22/10/2015	19/11/2015	28	143,87	103,53	100,83	77,61	18,6	30,1	24,3	179,2
Primavera	6	19/11/2015	17/12/2015	28	142,73	113,50	143,39	122,42	18,9	29,1	24,1	218,6
Verão	7	17/12/2015	14/01/2016	28	248,89	191,54	176,88	213,06	23,4	26,1	24,7	524,6
Verão	8	14/01/2016	11/02/2016	28	83,40	101,02	103,06	94,47	25,7	26,1	26	163,4
Verão	9	11/02/2016	10/03/2016	28	139,90	149,60	131,70	128,25	19,4	29	24,2	243,4
Outono	10	10/03/2016	07/04/2016	28	97,83	92,01	92,75	88,05	19,1	30,2	24,7	153,7
Outono	11	07/04/2016	05/05/2016	28	68,55	67,37	81,23	63,83	17,8	29,3	23,6	7,2
Outono	12	05/05/2016	18/06/2016	28	40,28	38,34	35,58	28,29	14,1	24	19,1	248,6
Inverno	13	18/06/2016	28/07/2016	44	57,68	47,85	38,42	39,57	13,8	25,8	19,8	2,6
Inverno	14	28/07/2016	08/09/2016	40	29,57	34,71	21,95	24,80	14,09	26,6	20,4	70,8
Primavera	15	08/09/2016	20/10/2016	42	29,86	21,63	17,95	12,65	15,6	29,6	22,6	68
Primavera	16	20/10/2016	17/11/2016	28	122,74	42,50	33,14	18,56	17	28,5	22,8	319,6

A produção de biomassa de Marandu irrigada com (550 kg/ha/ano de N) ou sem (0 kg/ha/ano de N) adubação nitrogenada foi simulada com o auxílio do modelo APSIM *Tropical Pasture* (BOSI, 2017), considerando as condições dos experimentos de campo. Os dados simulados foram comparados aos dados de campo pelo índice de concordância de Willmot (1981), que é uma medida descritiva que reflete a precisão dos dados preditos (variáveis Y) em razão aos valores observados (variáveis X).

## 5.2. Parâmetros de temperatura

O modelo APSIM *Tropical Pasture* (Agricultural Production System Simular) foi utilizado para simulação de produtividade de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em 4 cidades no estado de São Paulo: Itapetininga (23° 35' 40" S, 48° 3' 14" O), São Carlos (22° 0' 55" S, 47° 53' 28" O), São José do Rio Preto (20° 49' 13" S, 49° 22' 47" O) e Araçatuba (21° 12' 41" S, 50° 25' 34" O). Para a simulação, foi utilizada uma série climática de 30 anos (1980 a 2009), obtida a partir da base Agritempo (AGRITEMPO, 2016). As cidades foram selecionadas em função de suas características climáticas contrastantes (Tabela 2).

Tabela 2. Características climáticas de Araçatuba, Itapetininga, São Carlos e São José do Rio Preto, localizadas no estado de São Paulo.

Cidade	Clima Koppen	Temperatura média °C			Precipitação (mm)			Balanço hídrico- Armazenamento Relativo		
		Anual	Águas	Seca	Anual	Águas	Seca	Anual	Águas	Seca
São Carlos	Cwa	21,4	23,1	19,8	1435	1147,5	287,5	0,68	0,82	0,55
Itapetininga	Cfa	20,5	22,6	18,4	1380	912,5	467,5	0,79	0,83	0,75
São José do Rio Preto	Aw	24,5	26	23	1384	1128,3	255,7	0,6	0,7	0,4
Araçatuba	Aw	24,2	25,9	22,4	1310	1008,4	301,6	0,58	0,68	0,47

As simulações foram realizadas considerando-se as combinações entre produção em condições de sequeiro e com irrigação, e com ou sem adubação 550 kg de N/ha/ano. A partir dos resultados obtidos, a eficiência de uso do N foi estimada para as condições de sequeiro e irrigada, de acordo com a equação:

$$EUN = \frac{MS \text{ com adubação (kg)} - MS \text{ sem adubação (kg)}}{\text{Dose de N aplicado (kg)}}$$

Os dados foram submetidos à análise de outliers e, em seguida, foi realizada análise de regressão entre eficiência de uso de nitrogênio e temperatura média. Com base nos dados de eficiência de uso de N de Marta Junior et al. (2004), foram definidas três classes de eficiência de uso de nitrogênio: baixa (<15 kg MS/kg N), moderada (15 a 45 kg MS/kg N); e alta (>45 kg MS/kg N). A temperatura associada a cada classe de eficiência de uso do N foi definida a partir da equação de regressão e associada a uma expectativa de resposta à adubação nitrogenada.

### 5.3. Parâmetros de disponibilidade de água no solo

A partir de revisão de literatura, foram definidos parâmetros de disponibilidade de água para o desenvolvimento de *Urochloa brizantha* cv. Marandu, e esses valores foram considerados como critérios hídricos para o zoneamento da época de adubação. O armazenamento relativo de água no solo a partir da qual a produção relativa de forragem é máxima ou corresponde a 80% da máxima foram associados à expectativa de resposta à adubação (Tabela 3). O armazenamento relativo de água no solo foi calculado utilizando-se dados provenientes do balanço hídrico sequencial (THORNTHWAITE & MATHER, 1955) para cada localidade, que considerou os dados de precipitação e irrigação. O balanço hídrico foi calculado em escala quinquidial (5-5 dias), considerando uma capacidade máxima de água disponível de 100 mm.

Tabela 3. Classificação de recomendação de adubação nitrogenada conforme definição de critério hídrico para *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

Produção Relativa	Expectativa de resposta à adubação
100%	Alta
99 a 80%	Moderada
< 80%	Baixa

### 5.4. Recomendação de época de adubação

A adubação nitrogenada em cada período foi classificada em “recomendada” ou “não recomendada”, a partir da combinação entre os critérios de disponibilidade de água e temperatura descritos acima (Tabela 4).

Tabela 4. Expectativa de resposta à adubação e critérios para recomendação de época de adubação para *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

Expectativa de resposta à adubação em função de critérios climáticos		Recomendação de adubação
Disponibilidade de água	Temperatura	
Alta	Alta	Recomendado
Alta	Moderada	Recomendado
Alta	Baixa	Não recomendado
Moderada	Alta	Recomendado
Moderada	Moderada	Recomendado
Moderada	Baixa	Não recomendado
Baixa	Alta	Não recomendado
Baixa	Moderada	Não recomendado
Baixa	Baixa	Não recomendado

Os dados de armazenamento relativo de água no solo e temperatura média de Itapetininga, São Carlos, São José do Rio Preto e Araçatuba foram submetidos à análise estatística descritiva. Os períodos nos quais havia probabilidade igual ou superior a 80% de ocorrer a condição “recomendada” foram considerados adequados para adubação nitrogenada. Os resultados foram confrontados com as recomendações disponíveis de época de adubação em cada região para avaliação dos modelos.



## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Simulação de resposta à adubação nitrogenada pelo modelo APSIM

O desempenho do modelo *APSIM-Tropical Pasture*, adaptado por Bosi (2017) para *Urochloa brizantha* cv. Piatã, foi testado para simulação de produção de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em condições com e sem adubação nitrogenada. (Figura 1).

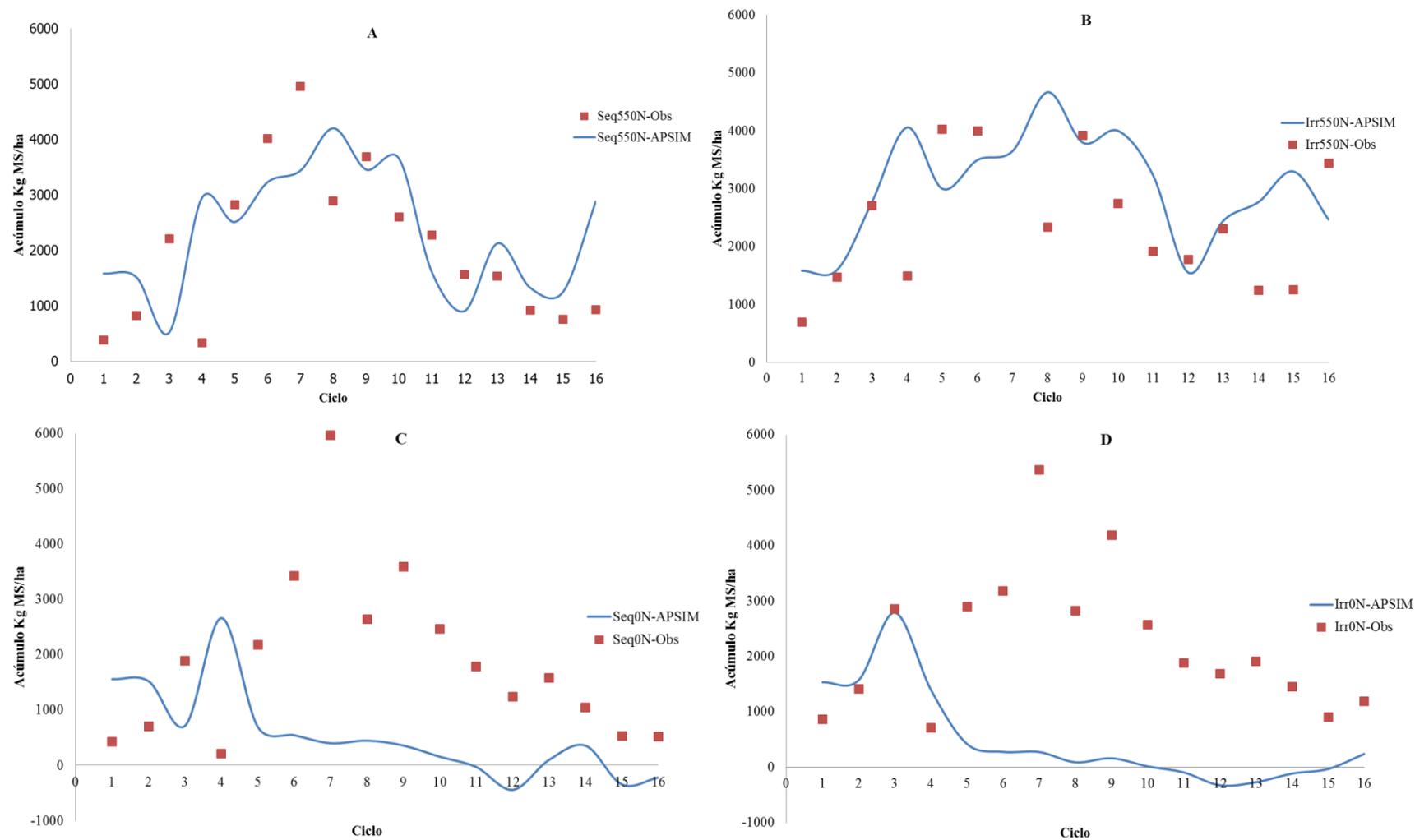


Figura 1. Representação gráfica dos dados preditos pelo APSIM e dados observados em acúmulo de forragem em kg MS/ha em 16 ciclos de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em São Carlos, A - condição de sequeiro e com adubação nitrogenada, B - condição de irrigação e com adubação nitrogenada, C - condição de sequeiro e sem adubação nitrogenada e D condição de irrigação e sem adubação nitrogenada.

O modelo APSIM *Tropical Pasture* não apresentou bom desempenho na simulação dos tratamentos analisados. O modelo ainda não foi parametrizado para *Urochloa brizantha* cv. Marandu, o que pode explicar o desempenho relativamente baixo nas simulações, mesmo em condições com adubação. Os cultivares Piatã e Marandu possuem diferenças quanto a relação folha colmo. Euclides et al. (2008), avaliando o efeito do pastejo na produção de forragem, destacaram que a estrutura do dossel é modificada dependendo da presença de colmo e material morto. Essas estruturas diferenciadas do dossel podem ser em parte devido a época de florescimento dos cultivares. Enquanto que *Urochloa brizantha* cv. Marandu não depende do fotoperíodo para florescer o *Urochloa brizantha* cv. Piatã floresce em dias mais longos, ocorrendo simultaneamente o alongamento de colmo na época de florescimento, havendo redução na relação lamina foliar e colmo visto que além do crescimento do colmo há aparecimento de folhas após a inflorescência. Lucena (2010), avaliando *Urochloa brizantha* cv. Marandu e cv. Piatã observou que na ausência de adubação nitrogenada o cultivar Marandu extraiu N em menor quantidade enquanto que o cv. Piatã apresentou uma taxa mais elevada de extração de N, devido à característica de alongamento de colmo apresentando maiores perfilhamento de gemas basilares. Lima (2013), na avaliação de cultivares *Urochloa brizantha* cv. Piatã e Marandu submetidas a regimes de desfolhação intermitentes, observou produção 10% menor de colmo em Marandu em relação ao Piatã, concluindo que os cultivares são produtivos porém respondem de forma diferenciada ao ambiente.

Pequeno et al. (2018), comparando o desempenho do modelo CROPGRO Perennial Forage na simulação de produção de cultivares de *Urochloa brizantha* (cv. Marandu) e *Brachiaria decumbens* (cv. Mulato II) e um de *Cynodon* spp. verificaram que as diferenças entre as plantas estavam relacionadas principalmente aos parâmetros de partição de fotoassimilados e composição morfológica das plantas.

O desempenho do modelo para os tratamentos com adição de N-fertilizante foi melhor do que para os tratamentos sem adubação, tanto em condições de sequeiro quanto sob irrigação (Tabela 5). O tratamento irrigado com nitrogênio foi o que obteve melhor índice  $d=0,85$ , seguido do sistema sequeiro com nitrogênio com  $d=0,73$  e  $R^2=0,79$  (tabela 7). Os tratamentos sem nitrogênio obtiveram os valores mais baixos, evidenciando que as simulações do APSIM em sistemas com adição de nitrogênio são melhores que os sistemas sem aplicação de nitrogênio no solo (Tabela 5). Bosi (2017) na parametrização de APSIM para cv. Piatã para massa foliar em sistema irrigado e sem irrigação encontrou valores  $d=0,94$  e  $0,92$  e com  $R^2=0,82$  e  $0,72$  respectivamente. Segundo Bosi (2017) o modelo APSIM foi capaz de simular o crescimento de pastagens tropicais em diferentes manejos e condições ambientais, sistema

irrigado e sequeiro e com baixo e elevado suprimento de nitrogênio, estações de seca e águas e manejos com corte ou pastejo, porém não foi simulado em condições sem adubação nitrogenada.

Tabela 5: Valores de índice  $d$  (índice de concordância),  $R^2$  (coeficiente de determinação) e RMSE (raiz do erro do quadrado médio do resíduo) dos dados observados e preditos pelo modelo APSIM para as condições de adubação nitrogenada e sistema sequeiro e irrigado em São Carlos.

Tratamento	$d$	$R^2$	RMSE
Irrigado 550N	0,85	0,5432	149
Sequeiro 550N	0,73	0,7975	278
Irrigado 0N	0,38	0,0133	-1746
Sequeiro 0N	0,34	0,0516	-1348

O baixo desempenho do APSIM *Tropical Pasture* nas simulações dos tratamentos sem adubação sugere que são necessários ajustes no modelo em relação à dinâmica de nitrogênio nas plantas, e à dinâmica da matéria orgânica no solo. O modelo APSIM *Tropical Pasture* possui um código responsável por simular a movimentação da matéria seca (MS) e N dentro da planta. Cada submodelo de órgão (folha, colmo, raiz e órgão de reserva) calcula a demanda por N e MS estruturais e não-estruturais, que são particionados com base no crescimento diário e na absorção de N. Os submodelos do órgão de reserva e da raiz podem fornecer MS e N não estrutural para suprir a demanda de outros órgãos (relação fonte- dreno) (BOSI, 2017). O APSIM *Tropical Pasture*, apesar de possuir estes submodelo para órgão de reserva, necessita de uma calibração da utilização de reservas orgânicas, o que pode ajudar a melhorar as simulações sem aplicação de N.

A matéria orgânica do solo é uma importante fonte de nitrogênio para as plantas, principalmente em sistemas sem aplicação de fertilizantes. De modo geral, 2% a 5% do estoques de N orgânico do solo são mineralizados por ano, sendo que a velocidade de degradação pode ser influenciada pela relação C/N (ANDREOLI, 2001). Nas simulações dos tratamentos sem fertilização com N, o modelo APSIM calculou uma decomposição da matéria orgânica, bem como uma utilização dos estoques de N, excessivamente rápidas, levando a um esgotamento precoce da fertilidade do solo e a uma queda da taxa de acúmulo de forragem ao longo dos ciclos (Figura 1). Nascimento et al. (2011) verificaram que o modelo APSIM superestima a decomposição de matéria orgânica e a mineralização de N em condições

tropicais, indicando a necessidade de parametrização do modelo antes de sua aplicação. Nascimento et al. (2011) apontaram ainda a necessidade de inclusão de novos parâmetros para o crescimento inicial de microrganismos no resíduo vegetal, visto que o modelo APSIM apresenta baixo desempenho nos primeiros meses de simulação em condições de trópico úmido. Importante ressaltar que os experimentos de campo foram implantados cerca de três meses antes do início das coletas. Em alguns ciclos, principalmente nos meses iniciais, não foi observada resposta á adubação nas parcelas (produção semelhantes entre tratamentos com e sem adubação), provavelmente em função de degradação da matéria orgânica incorporada ao solo durante a fase de implantação do experimento (Figura 1).

## **6.2. Temperatura e expectativa de resposta à adubação nitrogenada**

Apesar das limitações do modelo *APSIM-Tropical Pasture* para a simulação de crescimento de *Urochloa brizantha* cv. Marandu nas condições em questão optou-se por dar continuidade ao trabalho, de forma a estabelecer um protocolo inicial para definição de critérios meteorológicos para a adubação nitrogenada em pastagens, que poderá ser aplicado posteriormente com modelos melhor ajustados para as condições de interesse. Desta forma, foram feitas simulações do acúmulo de biomassa de cv. Marandu em condição irrigada, com e sem adubação nitrogenada, nos anos de 1980 a 2009, nas cidades de São Carlos, Itapetininga, São José do Rio Preto e Araçatuba, A figura 2 mostra a relação entre EUN e temperatura, obtida a partir dos dados simulados.

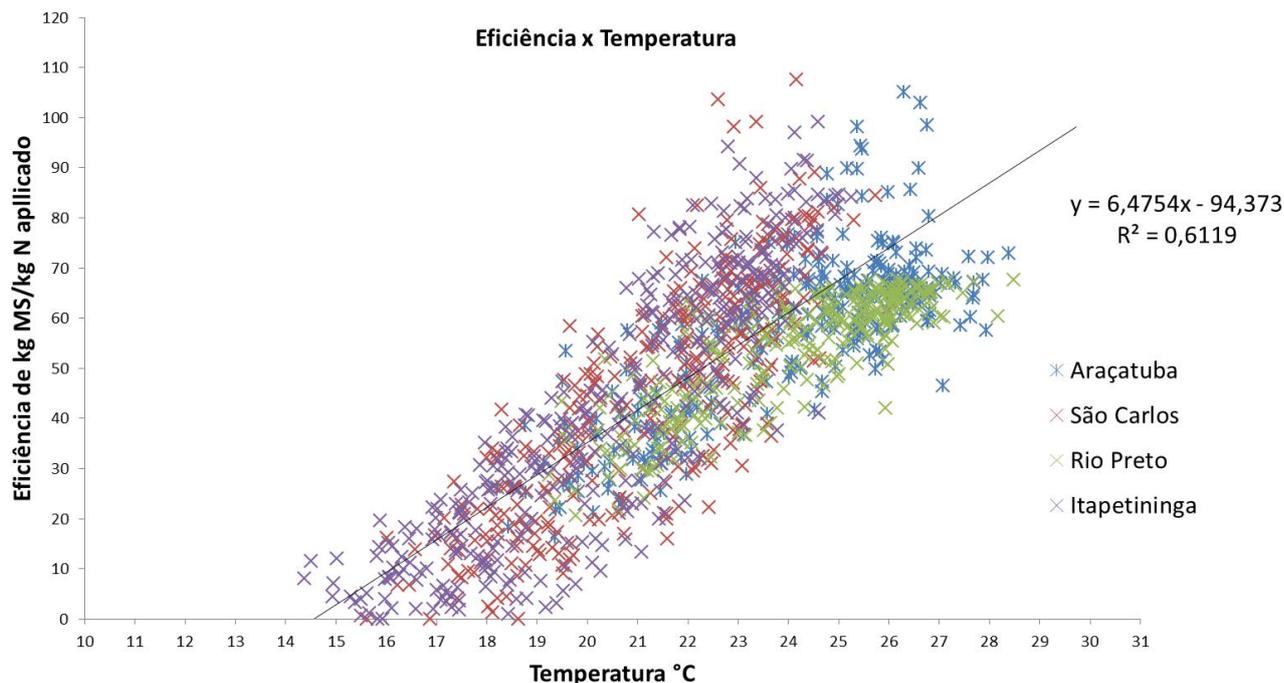


Figura 2. Gráfico de regressão entre temperatura e EUN em kg de MS/kg N aplicado.

Com base na expectativa de resposta à adubação nitrogenada, definida a partir dos dados de Marta Junior et al. (2004), e das regressões entre temperatura média e EUN (Figura 2), foi possível definir critérios térmicos para a adubação nitrogenada. A expectativa de resposta à adubação nitrogenada em cv. Marandu é baixa em temperaturas abaixo de 16,6°C, média entre 16,6 e 21,6°C e alta acima de 21,6°C (Tabela 6).

Tabela 6. Parâmetros de temperatura média das médias do ciclo e expectativa de resposta à adubação em pastagens de *Urochloa brizantha* cv. Marandu, calculados a partir da regressão entre temperatura média e a eficiência de uso de nitrogênio, estimados para quatro cidades do Estado de São Paulo com o auxílio do modelo *APSIM Tropical Pasture*.

Expectativa de resposta à adubação	Eficiência de uso de N	Temperatura média °C
Alta	>45 kg MS/ kg N	T média > 21,6°C
Moderada	15 a 45 kg MS/ kg N	16,7 -21,6°C
Baixa	<15 kg MS/ kg N	< 16,7°C

Não foram encontrados na literatura critérios térmicos para recomendação de adubação nitrogenada em pastagens. Alguns técnicos procuram utilizar as temperaturas cardinais de desenvolvimento das plantas como critério para a definição de adubação. A temperatura base inferior estimada para *Urochloa brizantha* cv. Marandu varia entre 10,5 e

17,2°C, dependendo da metodologia de determinação (SILVA et al., 2012; PEQUENO et al, 2014; CRUZ et al, 2011; LARA, 2007; Pezzopane et al., 2018). As temperaturas base inferior, primeira e segunda ótima e base superior foram estimadas durante a calibração do CROPGRO Perennial Forage em 11,1; 30,2; 40 e 45°C (PEQUENO et al. 2014) para a *Urochloa brizantha* cv. Marandu. A relação direta entre as temperaturas cardinais e a temperatura média do dia, no entanto, não é adequada, visto que ao longo do dia os valores de temperatura flutuam e podem se manter em diferentes faixas de temperaturas cardinais por algumas horas.

### 6.3. Disponibilidade de água e expectativa de resposta à adubação nitrogenada

Devido à influência dos fatores climáticos na produção de matéria seca das forrageiras, modelos para predição de produtividade (variável dependente) são gerados em função de variáveis climáticas (independentes) e apresentam boa estimativa de produção. Pezzopane et al. (2013) constataram que modelos baseados em regressões univariadas (temperatura mínima, temperatura média, evapotranspiração e graus-dia) são capazes de prever a produtividade satisfatoriamente em condições sem restrição hídrica, porém quando em condição de sequeiro há necessidade da inclusão de um fator de correção hídrica.

Pezzopane et al. (2018), investigando o efeito da disponibilidade hídrica e utilizando modelos empíricos para estimar a produção de MS, observaram que valores de armazenamento relativo de água no solo abaixo de 0,82 são prejudiciais para a produção do capim Marandu.

A partir da relação entre produção relativa e armazenamento relativo de água no solo definida por Pezzopane et al. (2018), foram estabelecidos critérios hídricos para recomendação de adubação nitrogenada (Tabela 7). Armazenamento relativo de água de 0,82 representa 100% da produção potencial e de 0,62 representa 80% da produção máxima de capim Marandu.

Tabela 7. Classificação de recomendação de adubação nitrogenada conforme definição de critério hídrico para o capim Marandu.

Armazenamento relativo de água	Produção relativa	Potencial de Produção
>0,82	100%	Alta
0,82-0,62	99 a 80%	Moderada
<0,62	< 80%	Baixa

#### 6.4. Época recomendada para adubação de pastagens em cidades do Estado de São Paulo

Para testar os critérios definidos para recomendação de época de adubação, foram selecionadas quatro cidades do Estado de São Paulo, com características climáticas contrastantes (Figura 3 e 4). Itapetininga e São Carlos apresentam temperatura média ao longo do ano mais baixa que São José do Rio Preto e Araçatuba. Em Itapetininga, a estação seca é menos marcante, enquanto em Araçatuba e São José do Rio Preto ela é mais prolongada.

Em Itapetininga a maior temperatura média ocorre nos meses de janeiro e fevereiro (média dos meses  $23,7^{\circ}\text{C}$ ) e os meses com menor temperatura são junho e julho ( $17$  e  $16,7^{\circ}\text{C}$ , respectivamente). As menores temperaturas encontradas em Araçatuba ocorrem nos meses de junho e julho (média  $20,8^{\circ}\text{C}$ ), em contrapartida os meses de janeiro a março apresentam as temperaturas mais elevadas ( $26^{\circ}\text{C}$ ). São José do Rio Preto apresenta as maiores temperaturas médias nos meses de novembro ( $26^{\circ}\text{C}$ ), dezembro ( $26^{\circ}\text{C}$ ), janeiro ( $25,9^{\circ}\text{C}$ ) e fevereiro ( $26,1^{\circ}\text{C}$ ) e as menores temperaturas nos meses de junho e julho (média dos meses  $21,5^{\circ}\text{C}$ ). Em São Carlos os meses de junho e julho apresentam as menores temperaturas ( $18,4^{\circ}\text{C}$ ) e a maior temperatura é observada nos meses de novembro ( $22,8^{\circ}\text{C}$ ), dezembro ( $22,9^{\circ}\text{C}$ ), janeiro ( $23,4^{\circ}\text{C}$ ) e fevereiro ( $23,7^{\circ}\text{C}$ ).

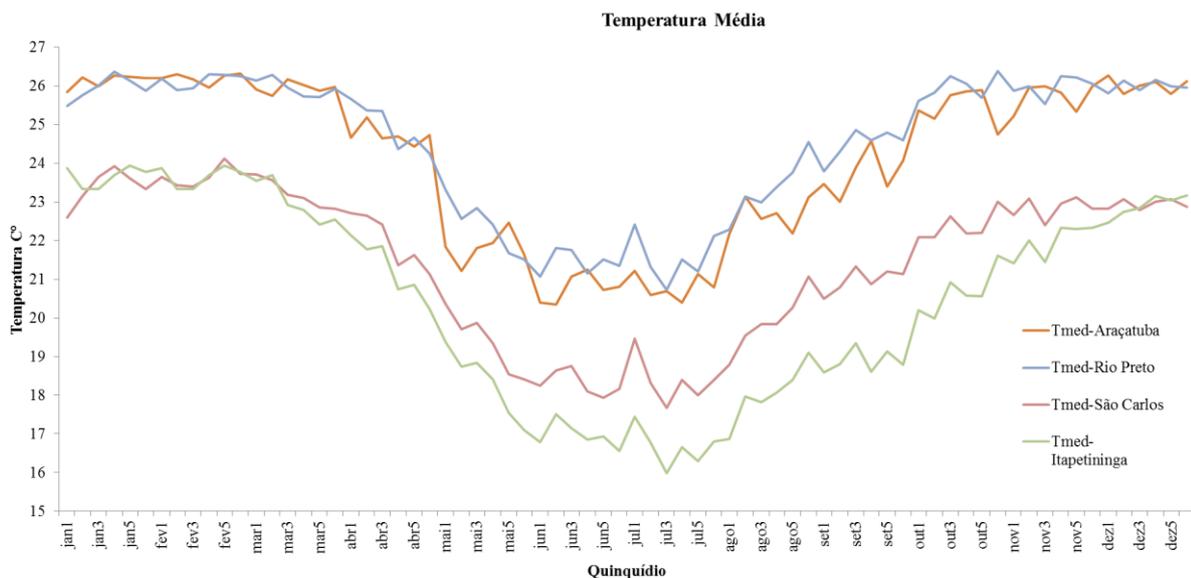


Figura 3- Temperatura média em quinquídios nas cidades de Araçatuba, São José do Rio Preto, Itapetininga e São Carlos no estado de São Paulo dos anos 1980 a 2009.

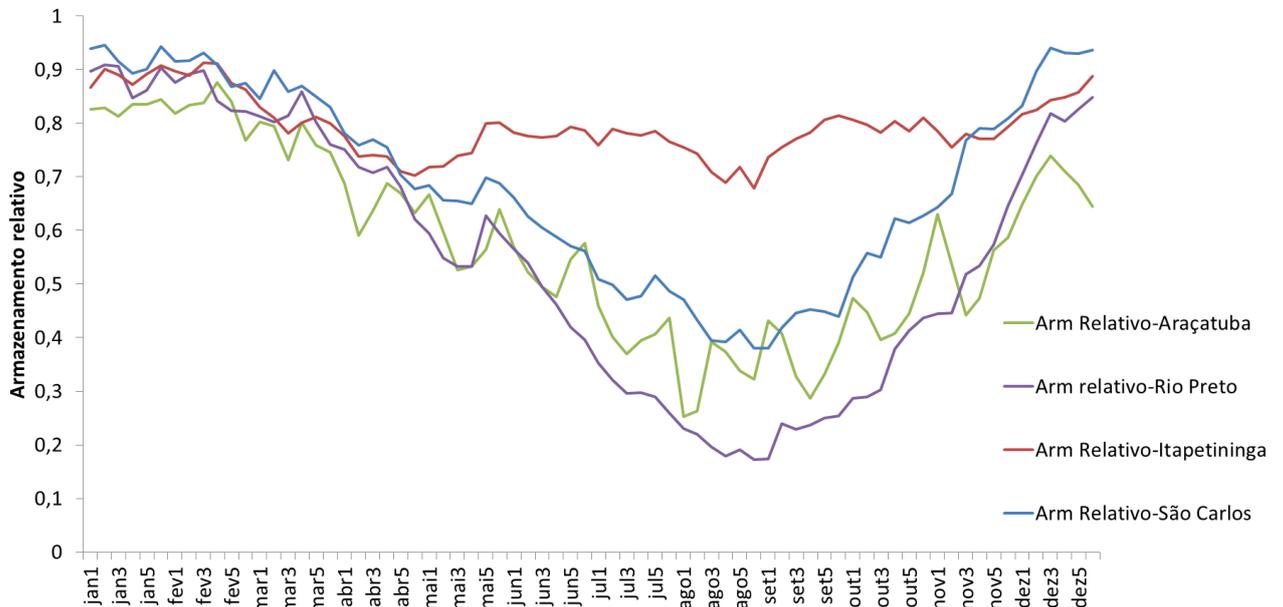


Figura 4- Armazenamento relativo em quinquédios nas cidades de Itapetininga, Araçatuba, São José do Rio Preto e São Carlos no estado de São Paulo dos anos 1980 a 2009 e condição mínima de armazenamento.

Com base nos critérios térmico e hídrico definidos acima e em dados históricos de clima, foi possível estabelecer as épocas recomendadas para adubação nitrogenada em quatro cidades do Estado de São Paulo: Araçatuba, Itapetininga, São Carlos e São José do Rio Preto. A adubação nitrogenada foi recomendada nos meses em que os critérios hídrico e térmico foram atendidos em, pelo menos, 80% dos anos analisados.

Em Araçatuba, a adubação nitrogenada é recomendada a partir do primeiro dia de dezembro até vinte e cinco de março. Entretanto, no mês de março apenas nos dias 20 a 25 ocorrem melhores condições para adubação nitrogenada. No restante do mês há risco de ocorrência de condições desfavoráveis é um pouco superior a 20% (Figura 5). Os dados de armazenamentos de água e temperatura indicam que a maior limitação na região seja hídrica, visto que em boa parte do ano o armazenamento relativo se apresenta em níveis inferiores a 0,62, condição na qual há prejuízos na produtividade de MS (Figura 5).

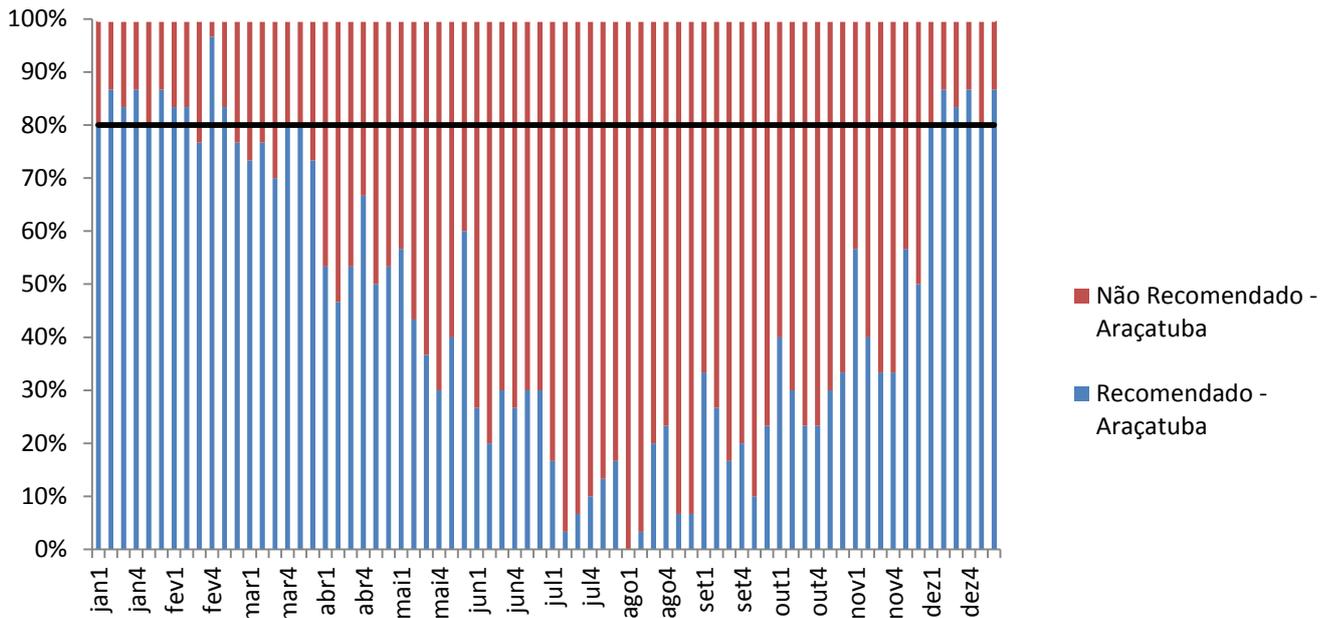


Figura 5. Representação gráfica de recomendação de adubação nitrogenada para *Urochloa brizantha* cv. Marandu em quinquídios para Araçatuba com base nos critérios de disponibilidade de água e temperatura.

Em Itapetininga, a adubação nitrogenada pode ser recomendada a partir de primeiro de outubro até o décimo dia de março, quando o risco climático associado à adubação nitrogenada é baixo (Figura 6). Entre março e abril o risco climático relacionado à questão hídrica aumenta um pouco, com ocorrência de níveis de armazenamento de água abaixo do indicado em cerca de 70% dos anos, porém ainda não há restrição térmica à adubação, apenas nos 15 primeiros dias de março ocorrem condições favoráveis para recomendação de adubação nitrogenada (Figura 6). A contar do dia vinte e seis de maio até final setembro a adubação nitrogenada não é recomendada na região de Itapetininga (Figura 6).

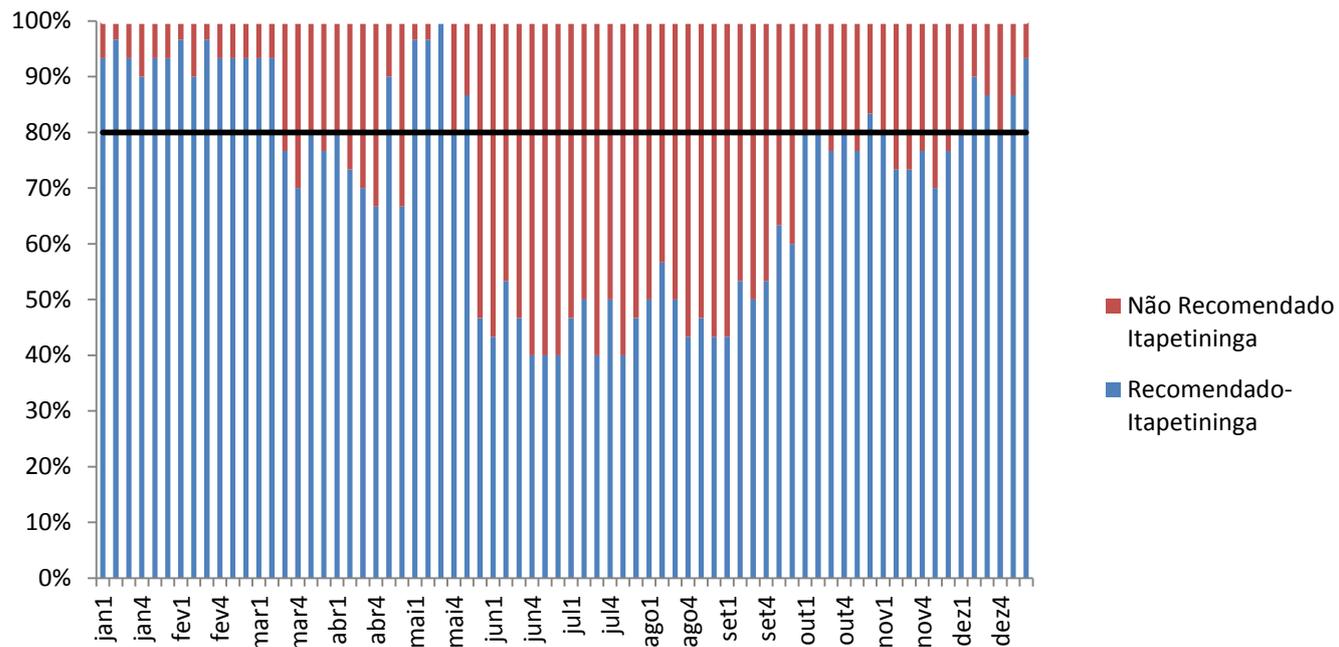


Figura 6. Representação gráfica de recomendação de adubação nitrogenada para *Urochloa brizantha* cv. Marandu em quinquídios para Itapetininga com base nos critérios de disponibilidade de água e temperatura.

Em São José do Rio Preto a adubação nitrogenada é recomendada a partir do dia onze de dezembro. Entre vinte e cinco de março a trinta de abril, o risco associado ao critério hídrico é um pouco mais elevado, voltando a diminuir em maio. Entre seis de junho e dez de dezembro a adubação nitrogenada não é recomendada em São José do Rio Preto.

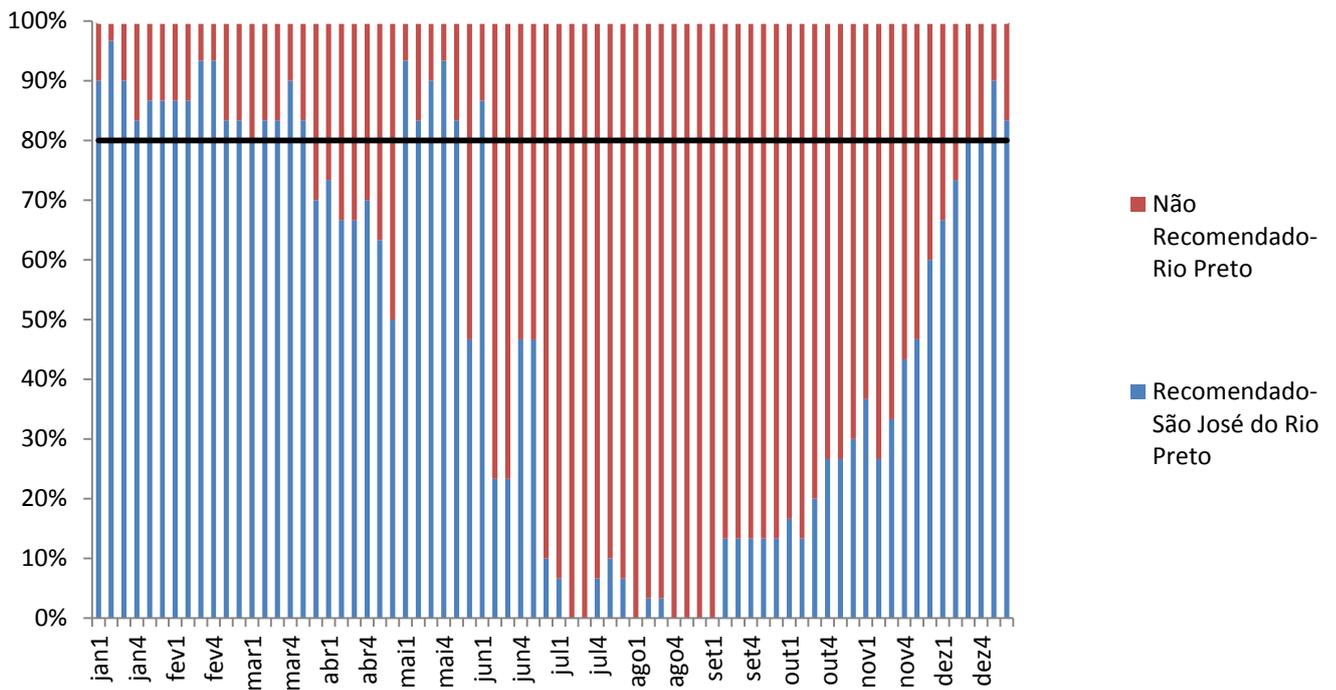


Figura 7. Representação gráfica de recomendação de adubação nitrogenada para *Urochloa brizantha* cv. Marandu em quinquídios para São José do Rio Preto com base nos critérios de disponibilidade de água e temperatura.

Em São Carlos, a adubação nitrogenada pode ser recomendada de vinte e seis de novembro a cinco de abril, sendo no restante do mês de abril o risco associado ao clima é ligeiramente mais elevado. A adubação nitrogenada não é recomendada do dia vinte e um de maio a vinte e cinco de novembro.

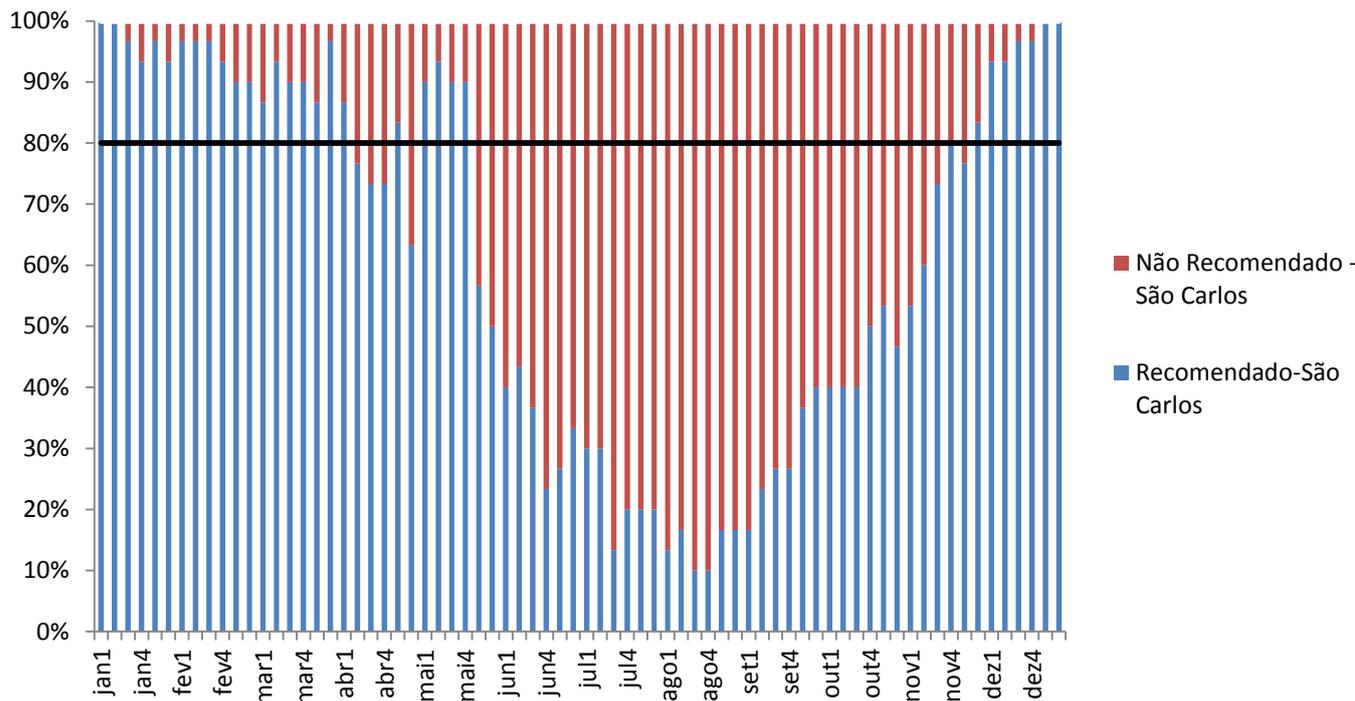


Figura 8. Representação gráfica de recomendação de adubação nitrogenada para *Urochloa brizantha* cv. Marandu em quinquídios para São Carlos com base nos critérios de disponibilidade de água e temperatura.

De modo geral, no estado de São Paulo se considera que a adubação nitrogenada pode ser recomendada entre outubro/novembro e maio. Os resultados apresentados indicam que há variação na expectativa de resposta à adubação nitrogenada entre as regiões, em função das variações na temperatura e disponibilidade de água. O aprimoramento de modelos e a definições de critérios térmicos e hídricos para adubação nitrogenada poderá contribuir para aumentar a eficiência de uso do nitrogênio, com impacto positivo sobre a sustentabilidade de sistemas de produção em pastagens.



## 7. CONCLUSÃO

Modelo APSIM não é capaz de prever satisfatoriamente a produtividade de *Urochloa brizantha* cv. Marandu principalmente em sistema sem adição de nitrogênio.

A definição de critérios relacionados à temperatura e disponibilidade de água possibilitou a identificação de épocas para recomendação de adubação nitrogenada em função da expectativa de resposta de *Urochloa brizantha* cv. Marandu visando as maiores eficiências de utilização de nitrogênio.

Na cidade de São Carlos, adubação nitrogenada é recomendada de vinte e seis de novembro a cinco de abril. Em São José do Rio Preto a recomendação é de onze de dezembro até final de maio, entretanto março e abril há riscos climáticos para adubação nitrogenada. Já em Itapetininga, recomenda-se adubação nitrogenada partir de primeiro de outubro a dez de março. E a recomendação para Araçatuba é do dia primeiro de dezembro a vinte de março.



## REFERÊNCIAS

- AGRITEMPO. Sistema de Monitoramento Agrometeorológico 2.0. Disponível em: . Acesso em: 19. jan. 2016.
- ALMEIDA, A.C dos S.; MINGOTI, R.; COELHO, R.D.; LOURENÇO, L.F. Simulação do crescimento do capim Tanzânia irrigado com base na unidade fototérmica, na adubação nitrogenada e na disponibilidade hídrica do período. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 33, n. 2, p. 215-222, 2011
- ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., DE MORAES, G., LEONARDO, J., SPAROVEK, G.. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728. 2013.
- ANDRADE, A.S., SANTOS, P.M., PEZZOPANE, J.R.M., ARAUJO, L.C., PEDREIRA, B.C., PEDREIRA, C.G.S., MARIN, F.R., LARA, M.A.S., 2015. Simulating tropical forage growth and biomass accumulation: an overview of model development and application. *Grass Forage Sci.* 2015
- ANDRADE, R.P.; VALENTIM, J.F. Síndrome da morte do Campim-brizantão no Acre: características, causas e soluções tecnológicas. Rio Bracno: Embrapa Acre, 2007. 43 p. (Documento, 105).
- ANDREOLI, C. C., PEGORINI, E. S., FERNANDES, F. Disposição do IODO de esgoto no solo. In: ANDREOLI, C. V., SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Coords.) Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. DESA/UFMG, SANEPAR. V. 6, p. 319-395, 2001.
- ARAUJO, L.C de.; SANTOS, P. M.; MENDONÇA, F. C.; MOURÃO, G. B. Establishment of *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, under levels of soil water availability in stages of growth of the plants. *Revista brasileira de zootecnia (Online)*, v. 40, p. 1405-1411, 2011.
- ARAUJO, L.C.; SANTOS, P.M.; RODRIGUEZ, D.; PEZZOPANE, J.R.M.; OLIVEIRA, P.P.A.; CRUZ, P.G. Simulating guinea grass production: empirical and mechanistic approaches. *Agronomy Journal, Madison*, v. 105, p. 61–69, 2013.
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: PEART, R. M.; CURRY, R. B. (Ed.) *Agricultural systems modeling and simulation*. New York: Marcel Dekker, 1998. chap. 18 p.651-691.
- BOSI, C. Parameterization and evaluation of mechanistic crop models for estimating *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã productivity under full sun and in silvopastoral system. Tese (Doutorado em Engenharia de sistemas agrícolas). 2017.160p. - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.
- BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. 2000. *Revista Ciência Rural*, v30, n.2 2000.
- CANTARUTTI, R. B.; MARTINS, C. E.; CARVALHO, M. M. DE.; FONSECA, D. M. DA.; ARRUDA, M. L.; VILELA, H. Recomendações de adubação para as diferentes culturas em Minas Gerais. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARAES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Ed.). *Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5º Aproximação*. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. p. 13-20, 1999

- CRUZ, P.G. da. Produção de forragem em *Brachiaria brizantha*: adaptação, geração e avaliação de modelos empíricos e mecanicistas para estimativa do acúmulo de forragem. 2010. 102p. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- CORSI, M.; NUSSIO, L.G. Manejo do capim elefante: correção e adubação do solo. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 10., 1992, Piracicaba. Anais ... Piracicaba: FEALQ, 1992. p. 87-115.
- CRUZ, P. G.; SANTOS, P. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; ARAUJO, L. C. Modelos empíricos para estimar o acúmulo de matéria seca de capim-marandu com variáveis agrometeorológicas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 46, p. 675-681, 2011.
- DOBBIE, K. E.; SMITH, K. A. The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N<sub>2</sub>O emissions from an imperfectly drained Gleysol. Europe and Journal of Soil Science, Oxford, v.52, n.4, p.667-673, 2001.
- ELGHARABLY, A.; MARSCHNER, P. Wheat grown in saline sandy loam soil as affected by N form and application rate. Plant and Soil, Dordrecht, v.328, p.303-312, 2010.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.
- EMBRAPA.. Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro. 2013
- EUCLIDES, V. P. B. COSTA, F.P.; MACEDO, M. C. M.; FLORES, R.; OLIVEIRA, M. P. de. Eficiência biológica e econômica de pasto de capim-tanzânia adubado com nitrogênio no final do verão. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.42, p.1345-1355, 2007.
- FAGERIA, N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, Campina Grande, v.2, p.6-16,1998.
- FAO – 2004 <http://www.fao.org/ag/AGA/AGAP/FRG/afris/es/Data/31.htm>.
- IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>.
- INMET- Instituto Nacional De Meteorologia. Instituto Nacional de Meteorologia. 2016. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 01 set. 2016.
- JAME, Y.W.; CUTFORTH, H.W. Crop growth models for decision support systems. Canadian Journal of Plant Science, Saskatchewan, v.76, p.9-19, 1996.
- LARA, M.A.S.; PEDREIRA, C.G.S.; BOOTE, K.J.; PEDREIRA, B.C.; MORENO, L.S.B.; ALDERMAN, P.D. Predicting Growth of *Panicum Maximum*: An adaptation of the CROPGRO-Perennial Forage Model. Agronomy Journal, Madison, v. 104, n. 3, p. 600-611, 2012.
- LARA, M.A.S. Respostas morfofisiológicas de cinco cultivares de *Brachiaria* spp. às variações estacionais da temperatura do ar e do fotoperíodo. 2007. 91p. Dissertação (Mestrado em Ciência animal e pastagem)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P C O.; KORNDORFER, G H.; PEREIRA, S. Balanço nitrogenado da adubação sólida e fluida de cobertura na cultura de milho em sistema plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 24, n. 2, p. 363-376, 2000.

- LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G H.; MOTTA, S A. Volatilização de amônia na cultura de milho: o Efeito da irrigação e substituição parcial de uréia por sulfato de amônio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 21, n. 3, p. 481-487, 1997.
- LIMA, C. D. L de. Estrutura do dossel e acúmulo de Forragem dos capins Piatã e Marandu Sob Pastejo Com Ovinos. Dissertação-Mestrado em Produção animal. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Campus de Macaíba.2013
- LUCENA, M. A. C., Características Agronômicas e estruturais de *Brachiaria* Spp submetidas a doses e fontes de Nitrogênio em Solo De Cerrado. 2010. 123p. Dissertação (Mestrado produção animal sustentável) - Agência Paulista de tecnologia dos agronegócios - Instituto de Zootecnia, Nova Odessa, 2010.
- LUGÃO, S. M. B.; RODRIGUES, L. R. A.; ABRAHÃO, J. J. S., EUCLIDES, B. M., ANIBAL, M. Acúmulo de forragem e eficiência de utilização do nitrogênio em pastagens de *Panicum maximum* Jacq. (Acesso BRA-006998) adubadas com nitrogênio. *Acta Scientiarum Animal Sciences*, v.52, p.371-379, 2003.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. London: Academic Press, 2nd ed. 889p, 1995.
- MARTHA JÚNIOR, G.B. Balanço de 15N e perdas de amônia por volatilização em pastagem de capim-elefante. Piracicaba, 1999. 75p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- MARTHA JUNIOR, G. B. Produção de forragem e transformação do nitrogênio do fertilizante em pastagem irrigada de capim Tanzânia. 2003. 149 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- MARTHA JÚNIOR, G.B.. A ciência tem sido fundamental para uma pecuária sustentável. *Visão Agrícola (USP / ESALQ)*, v. 10, p. 74-76, 2012.
- MARTHA JUNIOR, G. B.; VILELA, L.; BARIONI, L. G.; SOUSA, D. M. G.; BARCELLOS, A. O. Manejo da adubação nitrogenada em pastagem. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 21., 2004, Piracicaba. Anais... Piracicaba: FEALQ, 2004. p. 155-215.
- MARTHA JÚNIOR, G.B.; VILELA, L. ; SOUSA, D. M. G. ; BARCELLOS, A. O. . Adubação nitrogenada. In: MARTHA JR., G.B.; VILELA, L.; SOUSA, D.M.G.. (Org.). *Cerrado: uso eficiente de corretivos e fertilizantes em pastagens*. 1ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007, p. 117-144.
- MCWILLIAM , J. R. Response of pastures plants to temperature. In: WILSON, J. R. (Ed.). *Plant relation in pastures*. Melbourne: CSIRO, 1978. p.17–34.
- MEDEIROS, A.T. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE. 2002. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.
- MENDONÇA, F.C.; RASSINI, J.B. Temperatura-base inferior e estacionalidade de produção de gramíneas forrageiras tropicais. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006. 9p. (Circular técnica 45)
- MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. Principles of plant nutrition. 5th.ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849p.

- MONTEIRO, F. A. Concentração e distribuição de nutrientes em gramíneas e leguminosas forrageiras. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM, 2., 2004, Viçosa, MG. Anais... Viçosa, MG: UFV, 2004. p. 71- 107.
- NASCIMENTO, A. F do.; MENDONÇA, E de S.; LEITE, L. F. C.; NEVES, J. C. L. Calibration Of The Century, Apsim And Ndicea Models Of Decomposition And N mineralization Of Plant Residues In The Humid Tropics. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 35:917-928, 2011
- NUNES, S. G.; BOOCK, A.; PENTEADO, M. I de O.; GOMES, D. T. *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Campo Grande, MT: Embrapa, 1984. 31 p. (Embrapa Gado de Corte, Documento 21).
- OLIVEIRA, P.P.A. Manejo da calagem e da fertilização nitrogenada na recuperação de pastagens degradadas de *Brachiaria* sp. em solos arenosos. Piracicaba, 2001. 110p. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo.
- OVERMAN A.R.; ANGLELY A.E. Simulation models for coastal Bermudagrass. Gainesville, FL, USA: Agricultural Engineering Department, University of Florida. 1986
- PARSONS, A.J.; CHAPMAN, D.J. The principles of pasture and utilization. In: HOPKINS, A.(Ed.). Grass: its production & utilization. Okehampton: British Grassland Society, 1998. p.31-80
- PEDREIRA, B.C., PEDREIRA, C.G.S.; BOOTE, K.J.; LARA, M.A.S.; ALDERMAN, P.D. Adapting the CROPGRO perennial forage model to predict growth of *Brachiaria brizantha*. Field Crops Research, Amsterdam, v. 120, p. 370-379, 2011.
- PEQUENO, D.N.L., PEDREIRA, C.G.S., BOOTE, K.J. Simulating forage production of Marandu palisade grass (*Brachiaria brizantha*) with the CROPGRO-Perennial Forage model. Crop Pasture Sci. 65, 1335–1348. 2014
- PEQUENO D. N. L.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE K. J.; ALDERMAN, P. D.; FARIA, A. F. G. Species-genotypic parameters of the CROPGRO Perennial Forage Model: Implications for comparison of three tropical pasture grasses. Grass Forage Science. DOI: 10.1111/gfs.12329. 2018
- PEZZOPAME, J. R. M.; SANTOS, P. M.; CRUZ, P. G. da.; BOSI, C.; SENTELHAS, P.C. An integrated agrometeorological model to simulate Marandu palisade grass productivity. Field Crops Research 224 (2018) 13–21
- PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M.; MENDONÇA, F. C.; ARAUJO, L. C. de ; CRUZ, P. G. da. Dry matter production of Tanzania grass as a function of agrometeorological variables. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 47, p. 471- 477, 2012.
- PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; SENTELHAS, P. C.; SANTOS, P.M.; NICODEMO, M.L.F. Produtividade e características biométricas do capim-braquiária em sistema silvipastoril. Pesquisa Agropecuária Brasileira (1977. Impressa), v. 49, p. 449-456, 2014.
- PEZZOPANE, J. R. M.; CRUZ, P. G.; SANTOS, P. M. ; BOSI, C.; ARAUJO, L. C. Simple agrometeorological models for estimating Guineagrass yield in Southeast Brazil. International Journal of Biometeorology (Print), v. 58, p. 1479-1487, 2013.
- PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A.C.; CORRÊA, L.A. Eficiência agronômica de uréia aplicada superficialmente em pastagem de capim Coastcross. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 38., 2001, Piracicaba. Anais... Piracicaba: FEALQ, 2001. p. 213-214.

- RAYMAN, P. R. Minha experiência com *Brachiaria brizantha*. Campo Grande, Rayman's Seeds Sementes de Pastagens Tropicais, 3p. 1983
- RUSSELLE, M.P. Nitrogen cycling in pasture systems. In: JOOST, R.E.; ROBERTS, C.A. (Ed.). Nutrient cycling in forage systems. Columbia: PPI;FAR, 1996. p.125-166.
- SANTOS FILHO, LF. Seed production: perspective from the Brazilian private sector: In: MILES, J.W.; MASS, B.L; VALLE, C.B. (Ed) *Brachiaria*: biology, agronomy and improvement. Cali: CIAT; Campo Grande: EMBRAPA CNPQC, 1996. Cap.9. p. 141-146.
- SANTOS, P.M.; BERNARDI, A.C.C.; NOGUEIRA, A.R.A. et al. Uso de nitrogênio em pastagens: estratégias de aplicação. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 24. Piracicaba, 2007. Anais... Piracicaba: Fealq, 2007. p. 131-152.
- SANTOS J. R., MONTEIRO, F. A. Nutrição em nitrogênio do capim-marandu submetido a doses de nitrogênio e idades de crescimento. Boletim de Indústria Animal, v.60, n.1, p.139-146, 2003.
- SILVA, E.A., SILVA, W.J., BARRETO, A.C., OLIVEIRA JUNIOR, A.B., PAES, J.M.V., RUAS, J.R.M., QUEIROZ, D.S., 2012. Dry matter yield, thermal sum and base temperatures in irrigated tropical forage plants. Rev. Bras. Zootec 41, 574–582. 2012
- SOARES FILHO, C. V. Recomendação de espécie e variedade de *Brachiaria* para diferentes condições, In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGEM, 11., 1994, Piracicaba. Anais... Piracicaba: FEALQ, 1994. p. 25-48.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954p.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. New Jersey: Centerton, 1955. 104 p. (Publications in Climatology, v. 8, n.1).
- TONATO, F.; BARIONI, L.G.; PEDREIRA, C.G.S.; DANTAS, O.D.; MALAQUIAS, J.V. Desenvolvimento de modelos preditores de acúmulo de forragem em pastagens tropicais. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 45, n. 5, p. 522-529, 2010.
- TONATO, F. Desenvolvimento e avaliação de modelos preditores de acúmulo de forragem em pastagens tropicais para apoio à tomada de decisão. 2009. 110f. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Animais e Pastagens, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- URQUIAGA, S. Eficiencia de la fertilización nitrogenada en los principales cultivos anuales. In: URQUIAGA, S.; ZAPATA, F. Manejo eficiente de La fertilización nitrogenada de cultivos anuales en America Latina y El Caribe. Porto Alegre: Gênese; Rio de Janeiro: Embrapa Agrobiologia, 2000. p. 31-49
- VALL S, J. F.M.; SENDULSKY, T. Descrição botânica. In: VALLS, J.F.M. Carta, 6 de julho de 1984. Brasília, para Saladino G. Nunes . Campo Grande, MS. p.4-6.
- VIEIRA, R. F. Ciclo do Nitrogênio. 2017. Brasília, DF.: Publicação digitalizada. Embrapa 2017.
- VICTORIA, R. L.; PICCOLO, M. C. ; VARGAS, A. M. . O CICLO DO NITROGENIO. In: CARDOSO, E.J.B.N.; S.M. TSAI; M.C.P. NEVES. (Org.). MICROBIOLOGIA DO SOLO. CAMPINAS: SOCIEDADE BRAS. DE CIENICA DO SOLO, 1992, p. 105-120.
- VILELA, L.; SOARES, W.V.; SOUSA, D.M.G.; MACEDO, M.C.M. Calagem e adubação para pastagens. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2002. p. 367-382.

WERNER, J. C. et al. Forrageiras. In: RAIJ, B. et al (Ed.). Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo (Boletim técnico 100). Campinas: IAC, 1996.

WERNER, J. C; PAULINO, V. T.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; ANDRADE, N. DE O. Forrageiras. In: RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.) Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas: IAC, 1997. P.263 (Boletim Técnico, 100) 1997

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. *Physical Geography* 2: 184–194. 1981