**MODELOS PARA ÁREA FOLIAR, FITOMASSA E EXTRAÇÃO DE
NUTRIENTES NA CULTURA DE ARROZ**

AXEL GARCÍA Y GARCÍA

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura
"Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, para
a obtenção do título de Doutor em Agro
de Concentração: Fitotecnia.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Fevereiro- 2002

**MODELOS PARA ÁREA FOLIAR, FITOMASSA E EXTRAÇÃO DE
NUTRIENTES NA CULTURA DE ARROZ**

AXEL GARCÍA Y GARCÍA

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Durval Dourado Neto

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura
"Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, para
a obtenção do título de Doutor em Agronomia, Área
de Concentração: Fitotecnia.

P I R A C I C A B A

Estado de São Paulo - Brasil

Fevereiro – 2002

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

García y García, Axel

Modelos para área foliar, fitomassa e extração de nutrientes na cultura do arroz / Axel García y García. - - Piracicaba, 2002.
90 p.

Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002.
Bibliografia.

1. Absorção (Fisiologia) 2. Fitotecnia 3. Folhas (Plantas) 4. Modelagem matemática I. Título

CDD 633.18

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

Aos meus filhos,
Cristian Alejandro,
Ana Silvia e
Rodrigo Fernando,
OFEREÇO.

Àqueles que me mostraram o caminho certo,
meus amados pais,

À Cecília, pela sua cumplicidade no meu projeto de vida;

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Durval Dourado Neto, pelos ensinamentos, pela paixão ao conhecimento, pelo exemplo de dedicação à Universidade e pela amizade;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pelo apoio financeiro;

Ao Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP, pela oportunidade;

O presente trabalho não teria sido possível sem o apoio irrestrito e profissionalismo dos colegas: Engenheiros Agrônomos: MSc. Maria del Valle Basanta, MSc. Ramiro Fernando López Ovejero e MSc. Cecilia Tojo Soler;

Ao Dr. Vagner Camarini Alves, pela valiosa colaboração nos estágios iniciais do projeto e à Eng. Agro. MSc. Aline Maia pelas sugestões na análise estatística;

À comunidade de estudantes estrangeiros da ESALQ, especialmente ao sempre amigo Juan Delgado Rojas;

Aos amigos: Adonis Moreira, Alexandre Heinemann, Alexandre Luiz Jordão e Ronaldo de Rossi Fernandes; parceiros de República, lembranças daquela bela época;

À Eliana Maria Garcia e Sílvia Maria Zinsly, da DBID/ESALQ USP, pela eficiência na revisão das referências bibliográficas;

À minha avó brasileira, Dona Diva, pelo carinho sempre presente;

Aos funcionários Osvaldo de Jesús Pelissari e Osmair Santos Neves, pelo apoio nos trabalhos de campo.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
RESUMO	xix
SUMMARY	xx
RESUMEN	xxi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 Aspectos gerais da cultura.....	2
2.2 Caracterização do crescimento e desenvolvimento da planta de arroz.....	4
2.2.1 Fenologia da cultura do arroz.....	5
2.2.1.1 Semeadura à emergência.....	7
2.2.1.2 Emergência ao início do perfilhamento	7
2.2.1.3 Início do perfilhamento ao perfilhamento pleno	7
2.2.1.4 Perfilhamento pleno até a elongação dos entrenós	8
2.2.1.5 Elongação dos entrenós ao início de formação da panícula	8
2.2.1.6 Início de formação da panícula ao início do emborrachamento	8
2.2.1.7 Início do emborrachamento à emissão da panícula	9
2.2.1.8 Emissão da panícula a grão leitoso	9
2.2.1.9 Grão leitoso a grão pastoso	10
2.2.1.10 Grão pastoso ao ponto de maturidade fisiológica	10
2.2.1.11 Ponto de maturidade fisiológica.....	10
2.2.2 Índice de área foliar.....	10

2.2.3	Crescimento e desenvolvimento relativo da cultura	11
2.2.4	Extração de nutrientes e produção de fitomassa seca	13
2.3	Modelagem e modelos matemáticos.....	19
2.3.1	Termos e definições	19
2.3.2	Modelos de simulação.....	21
2.3.3	Modelagem na cultura de arroz.....	22
3	MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1	Local do experimento e tipo de solo	24
3.2	Caracterização química do solo	25
3.3	Instalação do experimento	27
3.3.1	A variedade cultivada.....	27
3.3.2	Semeadura	28
3.4	Sistema de irrigação	28
3.5	Manejo da água de irrigação	28
3.6	Amostragens e determinações.....	29
3.7	Avaliações	29
3.7.1	Fenologia da cultura.....	29
3.7.2	Índice de área foliar.....	29
3.7.3	Fitomassa seca e acúmulo de macronutrientes	30
3.7.4	Rendimento de grãos.....	33
3.8	Monitoramento das condições climáticas	34
3.9	Desenvolvimento do modelo e simulação	34
3.9.1	Modelo proposto: fatos biológicos considerados.....	35
3.9.2	Estrutura do modelo proposto	38
3.9.3	Modelo proposto	38
3.10	Análise estatística.....	38
3.11	Procedimentos gerais para determinação do índice de área foliar e da fitomassa seca	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1	Fenologia da cultura.....	43

4.2	Índice de área foliar	44
4.2.1	Variação temporal do índice de área foliar	44
4.2.2	Modelagem da variação temporal do índice de área foliar	45
4.3	Fitomassa seca e acúmulo de macronutrientes	46
4.3.1	Procedimento simplificado para a estimativa do acúmulo de fitomassa seca e extração de macronutrientes	49
4.3.1.1	Variação temporal da fitomassa seca total e da extração de nutrientes	49
4.3.1.2	Modelagem e estimativa da variação temporal do acúmulo de fitomassa seca e da extração de macronutrientes	50
4.3.1.3	Taxa de absorção de macronutrientes na planta.....	52
4.3.2	Procedimento detalhado para a estimativa do acúmulo de fitomassa seca	55
4.3.2.1	Variação temporal da fitomassa seca e da extração de macronutrientes nos <i>nc</i> compartimentos e parte aérea da planta.....	55
4.3.2.2	Modelagem e estimativa da variação temporal do acúmulo de fitomassa seca e da extração de macronutrientes	57
4.4	Rendimento obtido	64
5	CONCLUSÕES	65
	ANEXOS	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
	APÊNDICES	

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Produção dos dez principais países produtores de arroz no mundo.	2
2 Produção dos dez principais países produtores de arroz na América do Sul.	3
3 Esquematização do processo de crescimento e desenvolvimento da planta de arroz (Adaptado de Murayama, 1995).	16
4 Variabilidade espacial de alguns atributos químicos do solo na área experimental.	26
5 Condições climáticas no período em que foi realizado o experimento.	34
6 Modelo para estimar o índice de área foliar da cultura de arroz.	40
7 Modelo SIMPLIFICADO para estimar a fitomassa seca total e a extração de macronutriente na cultura de arroz.	41
8 Modelo DETALHADO para estimar a fitomassa seca total e a extração de macronutriente na cultura de arroz.	42
9 Variação temporal do índice de área foliar observado (E: Emergência, PER: Perfilhamento, PAN: Panícula, EMB: emborrachamento, PMF: ponto de maturidade fisiológica).....	44
10 Variação temporal (a) e comparação (b) entre os valores calculados e estimados do índice de área foliar relativo (<i>IAFr</i>).	45
11 Variação temporal (<i>DAE</i> : dias após a emergência) do acúmulo fitomassa seca na parte aérea da planta e seus componentes.	46
12 Variação temporal (<i>DAE</i> = dias após a emergência) do acúmulo da fitomassa seca na planta e seus componentes.	46
13 Variação temporal (a) e comparação (b) entre os valores calculados e estimados de fitomassa seca total relativa (<i>FSTr</i>).	51

14 Variação temporal da extração de macronutrientes na cultura de arroz.	51
15 Análise de comparação entre os valores calculados e estimados da extração (kg.ha ⁻¹) de macronutrientes na cultura de arroz.	52
16 Variação temporal da taxa de extração (Te , kg.ha ⁻¹ .d ⁻¹) de macronutrientes.	53
17 Comparação da taxa de extração (Te , kg.ha ⁻¹ .d ⁻¹) de macronutrientes.	54
18 Variação temporal da taxa (Te , kg.ha ⁻¹ .d ⁻¹) e aceleração ($4e$, kg.ha ⁻¹ .d ⁻²) de extração de nitrogênio e potássio na cultura de arroz.	54
19 Variação temporal da fitomassa seca relativa referente aos <i>nc</i> compartimentos e à parte aérea da planta.	55
20 Variação temporal do acúmulo de fitomassa seca nos <i>nc</i> compartimentos e na parte aérea da planta.	58
21 Comparação entre os valores calculados e estimados de fitomassa seca relativa dos <i>nc</i> compartimentos e da parte aérea da planta de arroz.	59
22 Variação temporal da extração (kg.ha ⁻¹) de macronutrientes referente ao compartimento raiz da planta de arroz.	61
23 Variação temporal da extração (kg.ha ⁻¹) de macronutrientes referente ao compartimento folha e colmo da planta de arroz.	62
24 Variação temporal da extração (kg.ha ⁻¹) de macronutrientes referente ao compartimento panícula da planta de arroz.	62
25 Variação temporal da extração (kg.ha ⁻¹) de macronutrientes referente à parte aérea da planta de arroz.	63
26 Variação temporal (a) e comparação (b) entre os valores calculados e estimados de fitomassa seca total relativa ($FSTr$).	64
27 Variação temporal dos teores de macronutrientes na planta.	89
28 Variação temporal dos teores de macronutrientes na raiz.	89
29 Variação temporal dos teores de macronutrientes nas folhas e colmos.	90
30 Variação temporal dos teores de macronutrientes na panícula.	90
31 Variação temporal dos teores de macronutrientes na parte aérea da planta.	90

LISTA DE TABELAS

	Página
1 Descrição dos estádios fenológicos da cultura de arroz.....	6
2 Teores deficientes, críticos, adequados e tóxicos dos macronutrientes (<i>M</i>) para a planta de arroz.....	17
3 Extração dos macronutrientes na cultura de arroz em função do rendimento de grãos (<i>R</i> , kg.ha-J).....	18
4 Granulometria e classe textural do solo localizado na várzea do Departamento de Produção Vegetal da ESALQ-USP. Piracicaba, SP.....	24
5 Características agronômicas da variedade cultivada de arroz IAC 103.....	27
6 Assunções para obtenção do modelo referente à fitomassa seca relativa total, de raiz e de panícula ($Drm=I$).....	37
7 Assunções para obtenção do modelo referente à fitomassa seca relativa de folha e colmo e ao índice de área foliar relativo ($0 < Drm < I$).....	37
8 Esquema da análise da variância.....	39
9 Relação dos estádios fenológicos observados com graus-dia (<i>GD</i>), desenvolvimento relativo (<i>Dr</i>), dias após a semeadura (<i>DAS</i>) e dias após a emergência (<i>DAE</i>).....	43
10 Fitomassa seca total (<i>FST</i> ; kg.ha-l) e extração dos macronutrientes (kg.ha-l) (valores calculados).....	50
11 Valores absolutos (kg.ha-l) da extração de macronutrientes observada nos <i>nc</i> compartimentos e parte aérea da planta.....	56
12 Coeficiente empírico e acurácia referentes aos modelos propostos.....	58
13 Extração de macronutrientes (kg.ha-l) nos <i>nc</i> compartimentos e parte aérea da planta (valores estimados pelo modelo proposto).....	60

14 Componentes do rendimento observados no experimento.	64
15 Análise de variância relativa à variação temporal do índice de área foliar.	67
16 Valores médios do índice de área foliar ($m^2.m^{-2}$) e teste de comparação de médias por época de amostragem.	67
17 Análise de variância referente ao acúmulo de fitomassa seca total.	68
18 Valores médios de fitomassa seca total (FST , $g.planta^{-1}$) e teste de comparação de médias por época de amostragem.	68
19 Análise de variância relativa ao acúmulo de fitomassa seca da raiz.	69
20 Valores médios de fitomassa seca da raiz (FS_R , $g.planta^{-1}$) e teste de comparação de médias por época de amostragem.	69
21 Análise de variância relativa ao acúmulo de fitomassa seca de folha e colmo. ...	70
22 Valores médios de fitomassa seca de folha e colmo (FS_{FC} , $g.planta^{-1}$) e teste de comparação de médias por época de amostragem.	70
23 Análise de variância relativa ao acúmulo de fitomassa seca da panícula.	71
24 Valores médios de fitomassa seca da panícula (FS_P , $g.planta^{-1}$) e teste de comparação de médias por época de amostragem.	71
25 Análise de variância relativa ao acúmulo de fitomassa seca da parte aérea da planta.	75
26 Valores médios de fitomassa seca da parte aérea (FS_{PA} , $g.planta^{-1}$) da planta e teste de comparação de médias por época de amostragem.	72
27 Caracterização climática durante a execução do trabalho (os dados correspondem a períodos de 5 dias).	73
28 Variação temporal do índice de área foliar e acúmulo de fitomassa seca nas diferentes partes da planta de arroz (valores observados).	74
29 Relação das equações, análise dimensional e restrições referentes ao PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO para estimativa da fitomassa seca total e teor médio e extração de macronutriente na cultura de arroz.	75

30 Relação das equações, análise dimensional e restrições referentes ao PROCEDIMENTO DETALHADO para estimativa da fitomassa seca total e teor médio e extração de macronutriente na cultura de arroz.....	76
31 Relação das equações, análise dimensional e restrições referentes ao procedimento para estimativa do índice de área foliar na cultura de arroz.	77
32 Variação temporal do índice de área foliar (valores observados).....	86
33 Teor de nutrientes (g.kg^{-1}) observado nas diferentes partes da planta.....	87
34 Resumo estatístico para os teores de nutrientes observados nas diferentes partes da planta.	88

LISTA DE SÍMBOLOS

- $\acute{a}$ Parâmetro empírico referente ao modelo não linear proposto para estimar a fitomassa seca total relativa.
- Ae Aceleração de extração de macronutrientes na cultura de arroz ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-2}$).
- $\acute{a}_k$ Parâmetro empírico referente ao modelo não linear proposto para estimar a fitomassa seca do k -ésimo compartimento da planta.
- a_j Coeficiente linear referente ao modelo de estimativa do teor do j -ésimo macronutriente na planta de arroz.
- a_{jk} Coeficiente linear referente ao modelo de estimativa do teor do j -ésimo macronutriente no k -ésimo compartimento da planta de arroz.
- A Coeficiente linear correspondente à comparação entre os valores calculados e estimados de quaisquer atributos de interesse (adimensional) (análise de comparação).
- A_j Coeficiente linear, referente ao j -ésimo macronutriente, correspondente à comparação entre os valores calculados e estimados de quaisquer atributos de interesse (adimensional) (análise de comparação).
- A_k Coeficiente linear, referente ao k -ésimo compartimento da planta de arroz, correspondente à comparação entre os valores calculados e estimados de quaisquer atributos de interesse (adimensional) (análise de comparação).
- A_{jk} Coeficiente linear, referente ao j -ésimo macronutriente no k -ésimo compartimento da planta de arroz, correspondente à comparação entre os valores calculados e estimados de quaisquer atributos de interesse (adimensional) (análise de comparação).
- $\hat{a}$ Parâmetro empírico referente ao modelo não linear proposto para estimar o índice de área foliar relativo.

B	Número de blocos.
b_j	Coeficiente angular referente ao modelo de estimativa do teor do j -ésimo macronutriente na planta de arroz.
b_{jk}	Coeficiente angular referente ao modelo de estimativa do teor do j -ésimo macronutriente no k -ésimo compartimento da planta de arroz.
B	Coeficiente angular correspondente à comparação entre os valores calculados e estimados de quaisquer atributos de interesse (adimensional) (análise de comparação).
B_j	Coeficiente angular, referente ao j -ésimo macronutriente, correspondente à comparação entre os valores calculados e estimados de quaisquer atributos de interesse (adimensional) (análise de comparação).
B_k	Coeficiente angular, referente ao k -ésimo compartimento da planta de arroz, correspondente à comparação entre os valores calculados e estimados de quaisquer atributos de interesse (adimensional) (análise de comparação).
B_{jk}	Coeficiente angular, referente ao j -ésimo macronutriente no k -ésimo compartimento da planta de arroz, correspondente à comparação entre os valores calculados e estimados de quaisquer atributos de interesse (adimensional) (análise de comparação).
C_{if}	Comprimento da f -ésima folha da planta de arroz na i -ésima época de amostragem (m).
Ca	Cálcio.
D	Crescimento e desenvolvimento de um organismo.
d	Dia (unidade de tempo).
DAE	Dias após a emergência (d).
DAS	Dias após a semeadura (d).
DP	Densidade populacional (planta.ha^{-1}).
Dr_i	Crescimento e desenvolvimento relativo da cultura de arroz até a i -ésima época de amostragem (adimensional).
Dr_q	Crescimento e desenvolvimento relativo da cultura de arroz até o q -ésimo dia após a emergência (adimensional).

Drm	Crescimento e desenvolvimento relativo da cultura de arroz correspondente ao valor máximo da variável dependente.
Δt	Intervalo de tempo (no presente trabalho foi utilizada escala diária ($\Delta t = 1$ dia) para o cálculo da soma calórica) (d).
$\hat{a}_i$	Diferença entre os valores observados (ou calculados) e estimados do atributo <i>de interesse</i> , referente à i -ésima época de amostragem, correspondente ao erro a ser minimizado (método da soma dos quadrados mínimos).
$\hat{a}_{ji}$	Diferença entre os valores observados (ou calculados) e estimados do atributo de interesse, referente ao j -ésimo macronutriente na i -ésima época de amostragem, correspondente ao erro a ser minimizado (método da soma dos quadrados mínimos).
E_{ji}	Extração (valor calculado) do j -ésimo macronutriente até a i -ésima época de amostragem (kg.ha^{-1}).
f	Número de ordem da folha (utilizado como índice): $f = 1, 2, 3, \dots, \text{nf-ésima folha.}$
$\hat{E}_{ji}$	Extração (valor estimado) do j -ésimo macronutriente até a i -ésima época de amostragem (kg.ha^{-1}).
$\hat{E}_{jq}$	Extração (valor estimado) do j -ésimo macronutriente até o q -ésimo dia após a emergência (kg.ha^{-1}).
$\hat{E}_{jki}$	Extração (valor estimado) do j -ésimo macronutriente no k -ésimo compartimento até a i -ésima época de amostragem (kg.ha^{-1}).
FS	Fitomassa seca (kg.ha^{-1}).
FS_{ki}	Fitomassa seca (valor medido) do k -ésimo compartimento da planta de arroz na i -ésima época de amostragem (kg.ha^{-1}).
$\hat{FS}_{ki}$	Fitomassa seca (valor estimado) do k -ésimo compartimento da planta de arroz na i -ésima época de amostragem (kg.ha^{-1}).
FST_i	Fitomassa seca total (valor calculado) na i -ésima época de amostragem (kg.ha^{-1}).
$\hat{FST}_i$	Fitomassa seca total (valor estimado) na i -ésima época de amostragem (kg.ha^{-1}).

FS_{rik}	Fitomassa seca relativa no k -ésimo compartimento da planta e na i -ésima época de amostragem.
FST_{MAX}	Fitomassa seca total máxima (valor calculado) (kg.ha^{-1}).
$FSTr_i$	Fitomassa seca total relativa (valor calculado) na i -ésima época de amostragem (adimensional).
$\hat{FSTr}_i$	Fitomassa seca total relativa (valor estimado) na i -ésima época de amostragem (adimensional).
$\tilde{a}$	Coefficiente (d^{-1}) de proporcionalidade do modelo de Blackman (1919).
GD_i	Índice térmico, graus-dia, soma térmica ou soma calórica até a i -ésima época de amostragem ($^{\circ}\text{C.d}$).
GD_q	Graus-dia até o q -ésimo dia após a emergência.
GD_{pmf}	Soma calórica da planta de arroz até o ponto de maturidade fisiológica ($^{\circ}\text{C.d}$).
ha	Hectare
i	Época de amostragem (utilizado como índice): $i = 1$: plântula $i = 2$: quatro folhas $i = 3$: início do perfilhamento $i = 4$: perfilhamento pleno $i = 5$: elongação entrenós $i = 6$: início da panícula $i = 7$: início do emborrachamento $i = 8$: emissão da panícula $i = 9$: grão pastoso $i = 10$: ponto de maturidade fisiológica
IAF	Índice de área foliar.
IAF_i	Índice de área foliar na i -ésima época de amostragem ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$).

$IAFr_i$	Índice de área foliar relativo (valor calculado) na i -ésima época de amostragem ($m^2.m^{-2}$).
$\hat{IAF}_i$	Índice de área foliar relativo (valor estimado) na i -ésima época de amostragem ($m^2.m^{-2}$).
j ou J	Macronutriente (j : utilizado como índice. J : utilizado na análise dimensional): $j = 1$: N (nitrogênio) $j = 2$: P (fósforo) $j = 3$: K (potássio) $j = 4$: Ca (cálcio) $j = 5$: Mg (magnésio) $j = 6$: S (enxofre)
K	Potássio.
k	Compartimento (órgão) da planta de arroz (utilizado como índice): $k = 1$: raiz $k = 2$: folha e colmo $k = 3$: panícula
$\ddot{e}$	Parâmetro empírico ($kg.ha^{-1}$) (curva logística de Verhulst-Pearl).
L_{if}	Largura da f -ésima folha da planta de arroz na i -ésima época de amostragem (m).
m	Metro.
M	Nutriente (designação genérica).
Mg	Magnésio.
M_{ji}	Teor do j -ésimo macronutriente na i -ésima época de amostragem ($g.kg^{-1}$).
$\hat{M}_{ji}$	Teor (valor estimado) do j -ésimo macronutriente no k -ésimo compartimento da planta de arroz na i -ésima época de amostragem ($g.kg^{-1}$).
M_{jki}	Teor (valor calculado) do j -ésimo macronutriente no k -ésimo compartimento da planta na i -ésima época de amostragem ($g.kg^{-1}$).
MO	Matéria orgânica.
N	Nitrogênio.
nc	Número de compartimentos.

nf	Número de folhas.
P	Fósforo.
δ	constante “pi”
pmf	Ponto de maturidade fisiológica.
QF	Quantidade do fertilizante.
q	Dia após a emergência (utilizado como índice): $q = 1, 2, 3, \dots, 116$ dias após a emergência (duração do ciclo da cultura: emergência ao ponto de maturidade fisiológica).
r	Coeficiente de correlação.
R	Rendimento de grãos de arroz ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).
Ro	Rendimento observado ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).
Rc	Rendimento corrigido ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).
S	Enxofre.
Sen	Função seno.
t	tempo.
T_{BI}	Temperatura base inferior da planta de arroz ($^{\circ}\text{C}$).
Te	Taxa de extração de macronutrientes na cultura de arroz ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot d^{-1}$).
T_q	Temperatura média do ar do q -ésimo dia após a emergência ($^{\circ}\text{C}$).
TM	Teor do macronutriente.
$Tmax_q$	Temperatura máxima do q -ésimo dia após a emergência ($^{\circ}\text{C}$).
$Tmin_q$	Temperatura mínima do q -ésimo dia após a emergência ($^{\circ}\text{C}$).
$\hat{e}$	Parâmetro empírico ($\text{ha} \cdot d^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) (curva logística de Verhulst-Pearl).
T_{BS}	Temperatura basal máxima da planta de arroz ($^{\circ}\text{C}$).
Uo	Umidade do grão observada (%).
Uc	Umidade do grão Corrigida (%).
w	Fator de forma geométrica da folha da planta de arroz (adimensional).

MODELOS PARA ÁREA FOLIAR, FITOMASSA E EXTRAÇÃO DE NUTRIENTES NA CULTURA DE ARROZ

Autor: Axel García y García

Orientador: Prof. Dr. Durval Dourado Neto

RESUMO

O objetivo do trabalho foi propor modelos para estimar índice de área foliar, fitomassa seca e extração de macronutrientes pela cultura de arroz, bem como determinar a época de máxima taxa de extração de *N* e *K*. O experimento foi conduzido na várzea do Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP. O solo foi classificado como Gleissolo Eutrófico, horizonte A chernozênico, textura média a argilosa (FAO –Unesco: *Gleysols*; USDA: *Humic Haplaquept*). Foi utilizada a variedade cultivada IAC 103, caracterizada por ser de ciclo médio e de alto rendimento. As variáveis observadas foram o índice de área foliar, a fitomassa seca em diferentes compartimentos da planta (raiz, folha e colmo e panícula) e os teores de macronutrientes por unidade de fitomassa seca. Para estimativa da extração de *N*, *P*, *K*, *Ca*, *Mg* e *S*, levou-se em consideração o teor de macronutrientes na planta e a produção, por unidade de área, de fitomassa seca. Em função dos resultados obtidos, foram propostos modelos cuja base matemática é fundamentada em eventos biológicos que acontecem ao longo do ciclo da cultura. Os modelos propostos apresentaram adequado desempenho para definir ordem de grandeza dos valores de índice de área foliar, fitomassa seca, extração de macronutrientes pela cultura de arroz, bem como para estimar a máxima taxa de absorção de *N* e *K*.

MODELS FOR LEAF AREA, DRY MATTER AND NUTRIENT EXTRACTION BY RICE CROP

Author: Axel García y García

Adviser: Prof. Dr. Durval Dourado Neto

SUMMARY

The objective of this study was to propose models to estimate leaf area index, dry matter and uptake macronutrients, and to determinate the maximum *N* and *K* uptake rates moment by rice crop. The field experiment was carried out at a wetland area of the Crop Science Department, University of São Paulo, Brazil. The soil is classified as Humic Haplaquept (FAO – UNESCO: *Gleysols*; Brazil: *Gleissolo Eutrófico*). The rice variety IAC 103 (middle season cycle and high yield) was used. Observed variables were leaf area index, dry matter from different parts of the plant (root, leaf and stem, and panicle) and macronutrient content. To estimate *N*, *P*, *K*, *Ca*, *Mg* and *S* extraction, the macronutrient content and dry matter were used. As results of this study, phytotechnical models, based on biological events that occurred during the crop cycle, were proposed. These models showed a satisfactory behavior to define the magnitude of estimated leaf area index, dry matter, macronutrient extraction by rice crop and maximum *N* and *K* uptake rates.

MODELOS PARA ÁREA FOLIAR, MATERIA SECA Y EXTRACCIÓN DE NUTRIENTES EN EL CULTIVO DE ARROZ

Autor: Axel García y García

Consejero: Prof. Dr. Durval Dourado Neto

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue proponer modelos para estimar el índice de área foliar, la materia seca y la extracción de macronutrientes por el cultivo de arroz y determinar la época de máxima tasa de absorción de *N* y *K*. El ensayo fue establecido en tierras bajas del Departamento de Producción Vegetal, Escuela Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidad de São Paulo, Brasil. El suelo es clasificado como *Humic Haplaquept* (FAO –Unesco: *Gleysols*; Brasil: *Gleissolo Eutrófico*). Fue utilizada la variedad de arroz IAC 103, caracterizada por ser de ciclo medio y de alto rendimiento. Las variables observadas fueron el índice de área foliar, la materia seca en diferentes compartimientos de la planta (raíz, hoja y caule, panícula) y el contenido de macronutrientes por unidad de materia seca. Para estimar la extracción de *N*, *P*, *K*, *Ca*, *Mg* y *S*, fueron considerados el contenido de nutrientes en la planta y la producción de materia seca. En función de los resultados observados, se propone modelos cuya base matemática se fundamenta en eventos biológicos que ocurren a lo largo del ciclo del cultivo. Los modelos propuestos presentaron desempeño adecuado para definir la magnitud de los valores de índice de área foliar, materia seca, la extracción de los macronutrientes por el cultivo de arroz, así como para estimar la máxima tasa de *N* y *K*.

1 INTRODUÇÃO

A cultura do arroz é uma das atividades agrícolas mais praticada no mundo, sendo o cereal mais consumido e a base da alimentação de mais de dois terços da população do globo. O Brasil é o décimo produtor mundial. Excluindo os países asiáticos, o Brasil se torna o primeiro produtor mundial. No entanto, o Brasil ocupa a 46ª. posição mundial em rendimento médio e é o último dentre os países do Mercosul, produzindo por unidade de área, metade do produzido pelo Uruguai.

Os baixos rendimentos brasileiros devem-se, principalmente, à produção de arroz sob o sistema de sequeiro, com rendimentos muitas vezes inferiores a 1000 kg.ha⁻¹. Porém, a adoção de novas tecnologias e a migração desse sistema para regiões com melhor distribuição pluviométrica e baixo risco climático está permitindo melhores rendimentos nos últimos anos.

Também, o inadequado planejamento das atividades agrícolas traz como consequência o aumento de riscos quanto à possibilidade de insucesso no processo produtivo. O conhecimento das exigências edafoclimáticas e nutricionais da cultura e a adoção de ferramentas adequadas para a tomada de decisões é o primeiro passo para se obter melhores resultados. Sendo assim, a compreensão dos processos envolvidos no crescimento e desenvolvimento da cultura do arroz é fundamental para se planejar sua produção de forma sustentável, e a modelagem é o instrumento de integração dos processos que acontecem ao longo do ciclo da cultura.

O trabalho teve como objetivo propor modelos fitotécnicos para estimar índice de área foliar, fitomassa seca e extração de macronutrientes; bem como determinar a época de máxima taxa de extração de nitrogênio e potássio pela cultura de arroz.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais da cultura

O arroz é muito utilizado na dieta humana, em todas as camadas sociais. O consumo *per capita* no Brasil atingiu em 1991 seu pico com 76,3 kg.ano⁻¹, permanecendo atualmente em 74,0 kg.ano⁻¹.

Atualmente, cerca de 90% do volume mundial do grão, estimado em 586,6 milhões de toneladas de arroz em casca, é produzido na Ásia (Figura 1) (FAO, 2002). Segundo o Anuário Brasileiro do Arroz (2001), o consumo global foi superior à produção, causando leve redução do estoque mundial.

Figura 1 - Produção dos dez principais países produtores de arroz no mundo.

Como pode ser observado na figura anterior, sem os países asiáticos, o Brasil ocupa a primeira posição mundial em termos de produção sendo, conseqüentemente, o maior produtor entre os países da América do Sul (Figura 2) (FAO, 2002).

No entanto, o Brasil ocupa ao nível mundial a quadragésima sexta posição em termos de rendimento (produção por unidade de área) e a décima primeira posição entre os países produtores da América do Sul. No Mercosul, os mais altos rendimentos médios

são obtidos no Uruguai (6300 kg.ha^{-1}), o dobro do rendimento médio brasileiro (3200 kg.ha^{-1}) (FAO, 2002).

Figura 2 - Produção dos dez principais países produtores de arroz na América do Sul.

O mercado mundial de arroz é pouco dinâmico. No início da década de 1990, a movimentação do grão foi de aproximadamente 13 milhões de toneladas, enquanto que em 2001, de 25 milhões de toneladas. Sem dúvida é um volume reduzido frente ao que se produz, mas perfeitamente aceitável, diante do elevado consumo em grande parte dos países produtores. O mercado brasileiro apresenta-se bastante estável, com leve tendência ao aumento no estoque final a partir da safra 1999/2000, (Anuário Brasileiro do Arroz, 2001).

No Brasil, o arroz é cultivado em dois ecossistemas: várzeas e terras altas, predominando no primeiro ecossistema o sistema de cultivo com irrigação controlada, ocupando cerca de um milhão de hectares na região subtropical (RS e SC), com manejo de alto nível tecnológico e rendimento médio de 5500 kg.ha^{-1} .

O ecossistema de terras altas já ocupou um papel de relevância na produção de arroz sob o sistema de sequeiro nas décadas de 1960 e 1980, sendo uma alternativa satisfatória para o desbravamento dos cerrados. Nesse ecossistema, os rendimentos obtidos variam de pouco mais de 700 kg.ha^{-1} (Piauí) a quase 2000 kg.ha^{-1} na região Centro-Oeste, o que explica os baixos rendimentos brasileiros. Atualmente, o arroz de terras altas migrou para regiões de adequada distribuição pluviométrica (Centro-Norte do estado de Mato Grosso) e a redução do risco climático renovou o interesse pela

cultura, possibilitando a adoção de tecnologias recomendadas pela pesquisa (Guimarães & Sant'Ana, 1999).

Atualmente, o Brasil está tendo queda da produção nas terras altas, principalmente no Estado de Mato Grosso, em consequência dos bons preços da soja e o baixo valor do arroz no mesmo período. Apesar de diferenças tecnológicas nas lavouras arrozeiras, os Cerrados apresentam tendência de aumento na área semeada e no rendimento, com destaque para os cerrados do estado de Mato Grosso, por apresentar menor risco climático para a cultura (Anuário Brasileiro do Arroz, 2001).

No Rio Grande do Sul, principal estado produtor do país, há duas safras que a orizicultura vem reduzindo em área, produção e rendimento; devido principalmente a problemas climáticos (excesso de chuva na época de semeadura) e aos baixos preços registrados no mercado. No entanto, o Rio Grande do Sul e Santa Catarina são responsáveis por 55% da produção nacional, sendo que o RS contribui com 46% dessa produção, com apenas 25% da área cultivada, principalmente em terras baixas ou várzeas (Anuário Brasileiro do Arroz, 2001).

Por serem originados de sedimentos com grande heterogeneidade quanto à composição granulométrica e mineralógica, os solos de várzea apresentam grande diversidade nas suas características e propriedades físicas e químicas, sendo uma das principais a drenagem deficiente ou hidromorfismo (Curi et al., 1988).

Esses solos, quando cultivados sob inundação, apresentam características bastante adversas daquelas verificadas em condições de boa drenagem, destacando-se a reação do solo e as condições de oxidação e redução. Alterações dessas características podem acarretar mudanças na disponibilidade dos nutrientes, tanto dos presentes no solo quanto daqueles adicionados através da aplicação de fertilizantes, afetando o crescimento e desenvolvimento das plantas e conseqüentemente o rendimento e qualidade das sementes (Guilherme, 1990).

2.2 Caracterização do crescimento e desenvolvimento da planta de arroz

O crescimento e desenvolvimento das culturas anuais pode ser expresso em três partes: (i) inicial, caracterizado pelo crescimento lento (momento do estabelecimento da

cultura); (ii) intermediária, caracterizado pelo crescimento rápido (consolidação da cultura); e (iii) final, caracterizada pelo reduzido ou nulo crescimento (maturação da cultura) (Penning de Vries, 1987; Pereira & Machado, 1987).

No caso do arroz, Kropff et al. (1995) dividem o ciclo da cultura em quatro grandes fases: (i) vegetativa básica ou inicial (desde a semeadura até o início da fase de sensibilidade ao fotoperíodo); (ii) de sensibilidade ao fotoperíodo (desde o final da primeira fase até o início da diferenciação dos primórdios florais); (iii) do final da segunda fase até o início do florescimento; e (iv) enchimento do grão (desde as primeiras etapas do florescimento até o ponto de maturidade fisiológica).

2.2.1 Fenologia da cultura do arroz

O estágio de crescimento e desenvolvimento fenológico da planta define a sua idade fisiológica e é caracterizado pela aparência e formação de vários órgãos. A descrição dos estádios fenológicos é apresentada na Tabela 1, conforme preconizado por Murayama (1995), Fernández et al. (1985) e Yoshida (1981).

A mais importante mudança fenológica acontece da fase vegetativa à fase reprodutiva, determinando as trocas na distribuição da fitomassa seca nos órgãos. Essas mudanças fisiológicas e morfológicas exigem a quantificação precisa do desenvolvimento fenológico para a operacionalização de modelos de simulação, sendo a temperatura a variável climática mais importante nos processos de troca na planta (Kropff et al., 1995).

Em termos morfológicos, o ciclo de vida da planta de arroz inicia-se com a germinação, seguida do crescimento e desenvolvimento dos brotos e emergência das folhas, a elongação internodal, o aparecimento da panícula, o florescimento, o enchimento e maturação dos grãos e finalmente a morte da planta. Com essas mudanças morfológicas, a fitomassa seca da planta aumenta gradualmente até o ponto de maturidade fisiológica. Em outras palavras, o processo de crescimento da planta de arroz é usualmente registrado nas mudanças na massa da planta, no número de perfilhos, na massa da palha, na massa da panícula bem como outras características de importância

como a data de semeadura ou transplântio, o início do emborrachamento e a colheita (Garcia et al., 1985; Murayama, 1995).

Tabela 1. Descrição dos estádios fenológicos da cultura de arroz.

Fase	Duração (dias)	Caracterização sucinta	Estádio
Vegetativa	50-55	Plântula	V ₀
		Quatro folhas	V ₁
		Início do perfilhamento	V ₂
		Perfilhamento pleno	V ₃
		Elongação dos entrenós	V ₄
Reprodutiva	30-35	Início de formação da panícula	R ₅
		Início do emborrachamento	R ₆
		Emissão da panícula	R ₇
Maturação	30-35	Grão leitoso	M ₈
		Grão pastoso	M ₉
		Ponto de maturidade fisiológica	M ₁₀

Adaptado de Murayama (1995); Fernández et al. (1985) e Yoshida (1981).

O processo de crescimento da planta de arroz, que acontece entre as fases vegetativa e reprodutiva, é caracterizado pelo crescimento antes e depois do início da formação do primórdio floral (Murayama, 1995).

A fase vegetativa é caracterizada desde o período em que a plântula de arroz depende dos nutrientes do endosperma da semente até o período autotrófico (germinação, início do perfilhamento, perfilhamento pleno e final do perfilhamento). O perfilhamento pleno corresponde ao intervalo de tempo em que o número de perfilhos é máximo.

Ainda, a duração do ciclo da planta é regulada principalmente pelo período desde a germinação até o início da formação do primórdio floral e, geralmente, aceita-se que o período de crescimento vegetativo termina no estágio de perfilhamento máximo (Yoshida, 1981; Murayama, 1995).

A fase reprodutiva é dividida em dois estádios, caracterizados antes e depois do emborrachamento/florescimento. O primeiro estágio, diferenciação do primórdio floral,

é caracterizado pelo crescimento e desenvolvimento e alongação dos colmos, algumas vezes também chamado de estágio de alongação internodal (Kropff et al., 1995; Murayama, 1995).

A terceira fase, a maturação, é caracterizada pelo enchimento do grão e a senescência de folhas, perfilhos e raízes. Essa fase é subdividida nos estádios grão leitoso, grão pastoso, amarelecimento e ponto de maturidade fisiológica (Murayama, 1995).

2.2.1.1 Semeadura à emergência

A duração do período entre a semeadura e emergência é dependente da temperatura e umidade do solo e vigor da semente, principalmente. A emergência é caracterizada com o aparecimento da primeira folha, a qual não apresenta lâmina e é visível sobre a superfície do solo.

Em sementes pré-germinadas, a temperaturas de 26°C, a emergência ocorre entre dois a três dias após a semeadura. Em semeadura realizada com semente seca, dependendo das condições climáticas, especificamente umidade do solo e temperatura, e da profundidade de semeadura, a emergência ocorre entre seis a doze ou mais dias (Yoshida, 1981; Fernández et al., 1985).

2.2.1.2 Emergência ao início do perfilhamento

A primeira etapa do ciclo da cultura se refere ao período desde a emergência até o momento anterior ao aparecimento do primeiro perfilho. Durante essa etapa, observa-se a emergência de quatro folhas, sendo que a primeira morre aos dez ou doze dias de idade. No início, a plântula depende totalmente da semente (carboidratos, proteínas, entre outros compostos). Entre o sétimo e oitavo dia começa o período autotrófico, em que a planta fotossintetiza seus próprios requerimentos energéticos (Fernández et al., 1985).

2.2.1.3 Início do perfilhamento ao perfilhamento pleno

A segunda etapa compreende o período desde o aparecimento do primeiro perfilho até o momento em que a planta alcança o perfilhamento pleno. É a etapa mais longa do ciclo da planta, atingindo, aproximadamente, 45 dias em variedades cultivadas

precoces e de ciclo médio, 50 dias para variedades cultivadas tardias e 55 dias para variedades cultivadas sensíveis ao fotoperíodo. Algumas variedades cultivadas produzem perfilhos quaternários (Fernández et al., 1985; Murayama, 1995).

2.2.1.4 Perfilhamento pleno até a elongação dos entrenós

A terceira etapa se refere ao período desde o perfilhamento pleno até o momento em que se inicia a elongação dos entrenós. Esse estágio é muito importante pois está estreitamente relacionado com o melhoramento genético e com as práticas agrônômicas (Murayama, 1995).

Em variedades cultivadas precoces, o número máximo de perfilhos é atingido quase simultaneamente com o início de formação da panícula, mas em variedades cultivadas de ciclo longo pode preceder à elongação dos entrenós e o início de formação da panícula (Fernández et al., 1985).

O número de perfilhos varia em função da variedade cultivada, da fertilização, da densidade e do sistema de cultivo. Em arroz transplantado, (0,20m x 0,20m), tem-se observado mais de 30 perfilhos por planta aos 60 dias após a semeadura. No caso de arroz semeado diretamente, em alta densidade, o máximo número de perfilhos é atingido aos 30-40 dias após a semeadura (Fernández et al., 1985; Murayama, 1995).

2.2.1.5 Elongação dos entrenós ao início de formação da panícula

A quarta etapa compreende desde o momento em que o quarto entrenó do colmo principal, logo embaixo da inflorescência, começa a ser visível em comprimento, até o momento de início de formação da panícula. Em variedades cultivadas precoces, o quarto entrenó se alonga apenas 1 a 3 cm, antes da panícula ser visível, mas continua se alongando até que a inflorescência esteja completamente emergida, acima da folha *bandeira*. Essa elongação coincide com o desenvolvimento da inflorescência e ocorre nos quatro entrenós logo abaixo da panícula (Fernández et al., 1985, Yoshida, 1981).

2.2.1.6 Início de formação da panícula ao início do emborrachamento

A quinta etapa se refere ao período desde o início de formação da panícula (a diferenciação do meristema no ponto de crescimento inicia o primórdio da panícula) até o momento em que se inicia o emborrachamento, marcando o final da fase vegetativa e o

início da fase reprodutiva. Em variedades cultivadas de baixo porte e precoces, há sobreposição desse estágio com o anterior, independentemente do comprimento do dia. Nesse estágio, determina-se o número potencial de grãos por panícula e, conseqüentemente, o rendimento pode ser afetado de forma drástica por condições adversas (Fernández et al., 1985).

2.2.1.7 Início do emborrachamento à emissão da panícula

A sexta etapa corresponde ao período a partir do momento em que a panícula diferenciada é visível até o momento em que sua extremidade superior (ponta) encontra-se logo abaixo da folha *bandeira*. Em variedades cultivadas precoces, o crescimento e desenvolvimento da panícula ocorrem simultaneamente à elongação dos entrenós. Com a diferenciação das espiguetas, quando a panícula atinge 5cm de comprimento, forma-se, junto com o ráquis, a inflorescência, que cresce dentro da bainha da folha *bandeira*, formando o enchimento comumente chamado “emborrachamento”. Essa etapa é crítica, pois na diferenciação das espiguetas é determinado o número total de grãos. Nesse momento, condições ambientais adversas afetam o rendimento, reduzindo o número de espiguetas diferenciadas e férteis (Fernández et al., 1985; Murayama, 1995).

A folha *bandeira* cresce durante esse estágio até emergir totalmente, momento em que temperaturas baixas podem provocar esterilidade das flores (Fernández et al., 1985; Murayama, 1995).

2.2.1.8 Emissão da panícula a grão leitoso

A sétima etapa corresponde ao período a partir da emissão da panícula da bainha da folha *bandeira*, até o momento em que se inicia o enchimento dos grãos. Nesse estágio, a planta atinge sua máxima altura e é estabelecida a quantidade de perfilhos férteis (Fernández et al., 1985; Murayama, 1985).

Alta temperatura, combinada com vento seco e úmido, afeta seriamente a fecundação do estigma. Temperatura muito baixa (da água nas quadras ou do ar), pode causar efeito negativo semelhante (Fernández et al., 1985).

2.2.1.9 Grão leitoso a grão pastoso

A oitava etapa corresponde ao período a partir do início do enchimento dos grãos com um líquido leitoso (que pode ser retirado pressionando os grãos com os dedos) até o momento em que acontece a mudança de consistência na massa dos grãos. Aproximadamente cinco dias após a antese, os grãos ainda apresentam coloração verde e a panícula se dobra em arco de 90° pelo peso dos grãos no terço superior (Fernández et al., 1985; Murayama, 1995).

2.2.1.10 Grão pastoso ao ponto de maturidade fisiológica

A nona etapa corresponde ao período a partir do início de consistência farinácea no grão (de pastoso suave para farináceo em aproximadamente 15 dias e a cor muda de esverdeada para amarela) até a palha apresentar coloração amarela. A ponta da panícula se dobra em arco de 180° e a planta atinge sua máxima fitomassa seca (Fernández et al., 1985; Murayama, 1995).

2.2.1.11 Ponto de maturidade fisiológica

Em regiões tropicais, os grãos atingem o ponto de maturidade fisiológica em aproximadamente 30 dias após o florescimento. Em regiões mais temperadas, o processo é retardado com o aumento no enchimento e massa do grão. A planta atinge sua maturidade fisiológica quando 90% dos grãos estão maduros, apresentando aparência de palha na sua coloração amarela. Algumas espiguetas permanecem de coloração verde e não são preenchidas (Yoshida, 1981; Fernández et al., 1985; Murayama, 1995).

A produção de fitomassa seca pára, e eventualmente pode haver ligeira redução em consequência da deiscência de grãos e senescência da planta. Na planta, ainda podem permanecer alguns perfilhos não produtivos que não se desenvolveram (Fernández et al., 1985).

2.2.2 Índice de área foliar

O índice de área foliar corresponde à área da superfície total das folhas da planta por unidade de superfície de solo, geralmente expresso em $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$. A importância da área foliar de uma cultura é amplamente conhecida por ser um indicativo de produtividade, pois o processo fotossintético depende da interceptação de energia

luminosa pelas folhas. Assim, a superfície foliar de uma planta é a base do rendimento potencial das culturas (Watson, 1952).

Em geral, a variação temporal do índice de área foliar aumenta até um máximo, onde permanece por algum tempo, decrescendo em seguida, devido à senescência das folhas velhas. Como a fotossíntese depende da área foliar, o rendimento da cultura será maior quanto mais rápido a planta atingir o índice de área foliar máximo e quanto mais tempo a área foliar permanecer ativa (Pereira & Machado, 1987).

Yoshida (1981) relata que devido ao fato de o índice de área foliar ser uma propriedade muito variável, é difícil definir um valor ótimo. Estudos realizados por Pinheiro & Guimarães (1990), em diferentes localidades e épocas, relatam ampla *variação do IAF* ($1,5 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ a $8,3 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$), sendo que o máximo rendimento em grãos ($4500 \text{ kg}.\text{ha}^{-1}$) foi obtido com *IAF* entre 4,5 e $6,3 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$.

2.2.3 Crescimento e desenvolvimento relativo da cultura

O rendimento de grãos envolve uma série de processos relacionados ao crescimento e desenvolvimento da planta durante o ciclo da cultura. O termo crescimento se refere ao acúmulo de biomassa da planta, enquanto que o termo desenvolvimento se refere à diferenciação dos diferentes órgãos durante o ciclo da cultura (período entre a emergência e o ponto de maturidade fisiológica). Ainda, o termo fenologia se refere a estádios de crescimento e desenvolvimento identificáveis na planta. Ambos, crescimento e desenvolvimento são afetados pelo meio e por fatores genéticos (Yin, 1996). O termo estágio se refere a um determinado momento, caracterizado por algo observável da planta.

Há mais de 250 anos, Reaumur¹ (1735), citado por Yin (1996), introduziu a definição de unidades térmicas para prever o crescimento e desenvolvimento das plantas. Nesse enfoque, assume-se que as plantas precisam de um número fixo de soma calórica (temperatura) para desenvolver as suas diferentes fases. Nesse sentido, define-se

¹ REAUMUR, R.A.F. Thermetric observations made at Paris during the year 1735, compared to those made below the Equator on the isle of Mauritius at Algiers and on a few American Islands. Academic Science, Paris. 1735, 545p.

desenvolvimento e crescimento relativo da cultura como sendo a relação entre a soma calórica atual e a soma calórica da cultura correspondente ao ponto de maturidade fisiológica, que numa escala diária, pode ser estimada pela equação (1):

$$Dr_p = \frac{\sum_{q=1}^p (T_q - T_{BI})}{GD_{pmf}} = \frac{GD_p}{GD_{pmf}} \quad (1)$$

em que Dr_p se refere ao crescimento e desenvolvimento relativo da cultura até o p -ésimo dia após a emergência, T_q à temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) do q -ésimo dia após a emergência, T_{BI} à temperatura base inferior (8°C) (Gao et al., 1992), GD_p à soma calórica ($^{\circ}\text{C.d}$) no p -ésimo dia após a emergência e GD_{pmf} à soma calórica ($^{\circ}\text{C.d}$) da planta de arroz correspondente ao ponto de maturidade fisiológica.

Na maioria das plantas cultivadas, o acúmulo de fitomassa seca apresenta relação aproximadamente linear com a temperatura média do ar (escala diária) na faixa entre a temperatura base inferior e a temperatura ótima. Acima da temperatura ótima, o acúmulo decresce novamente de forma linear, até atingir a temperatura base superior. Para temperaturas abaixo da temperatura base inferior, ou acima da temperatura base superior, a taxa de crescimento e desenvolvimento da planta é igual a zero (Kropff et al., 1995).

No entanto, três temperaturas têm sido identificadas como sendo as relevantes para as culturas: a temperatura base inferior (T_{BI}), a temperatura ótima (T_O), e a temperatura base superior (T_{BS}). No caso da planta de arroz, essas temperaturas correspondem a 8°C , 30°C e 42°C , respectivamente (Gao et al., 1992).

Estudos realizados no Brasil por Souza & Costa (1992) na região de Uberaba – MG, em variedades cultivadas sob o sistema de sequeiro, relatam temperatura base inferior entre 10 a 15°C para as cultivares IAC 47, IAC 164, IAC 165 e IAC 25. Infeld et al. (1995), em estudo realizado na região de Pelotas, para cultivares de arroz irrigado de ciclos curto, médio e longo, obtiveram 11°C de temperatura base inferior para os três grupos de cultivares.

A temperatura média do ar do q -ésimo dia após a emergência (T_q , °C) é estimada pela média entre as temperaturas máxima ($Tmax_q$, °C) e mínima ($Tmin_q$, °C) do q -ésimo dia após a emergência, conforme a equação (2):

$$T_q = \frac{Tmax_q + Tmin_q}{2} \quad (2)$$

A soma calórica da cultura, correspondente ao ponto de maturidade fisiológica, é definida pela equação (3):

$$GD_{pmf} = \int_{t=0}^{t=pmf} T(t)dt - T_{Bl} \cdot t_{pmf} \quad (3)$$

em que $T(t)$ se refere à variação temporal da temperatura numa escala diária, entre a emergência ($t=0$) e o ponto de maturidade fisiológica ($t=t_{pmf}$), e t_{pmf} corresponde ao tempo, em dias após a emergência, necessário para atingir o ponto de maturidade fisiológica.

A expressão anterior pode ser aproximada pelo método de Gilmore & Rogers (1958), conforme a equação (4):

$$GD_p = \sum_{q=1}^p (T_q - T_{Bl}) \text{ para } [T_{Bl} \leq T_q \leq T_{BS}] \quad (4)$$

Para efeito de cálculo, se $Tmin_q < T_{Bl}$, faz-se $T_q = T_{Bl}$ e se $Tmax_q > T_{BS}$, faz-se $Tmax_q = T_{BS}$. O cálculo de ganho médio diário, em termos de soma calórica da cultura (GDD , °C.d), pode ser calculado pela equação (5):

$$GDD = \frac{GD_{pmf}}{t_{pmf}} \quad (5)$$

2.2.4 Extração de nutrientes e produção de fitomassa seca

O nitrogênio é nutriente que em termos práticos resulta em maior retorno econômico na cultura de arroz. A sua deficiência normalmente ocorre quando não é aplicado como fertilizante, embora a planta utilize menos de 40% do adubo nitrogenado aplicado (Yoshida, 1981; Arima, 1995).

Segundo Ishizuka (1971), o teor de nitrogênio na planta é maior na fase inicial de crescimento, decrescendo ligeiramente com o tempo após a translocação e voltando a crescer até a diferenciação do primórdio floral, em que novamente decresce até o estágio de enchimento de grãos, quando o teor permanece quase constante até o ponto de maturidade fisiológica.

Até o florescimento, o nitrogênio absorvido pela planta é armazenado nas folhas, depois é drenado ao grão em proporção de até 50% do total armazenado na planta. A absorção da outra metade ocorre depois do florescimento (Perdomo et al., 1985; Arima, 1995).

Pequenas quantidades de fósforo são acumuladas nas raízes e nas folhas até o início da panícula, aumentando só após o florescimento, quando as necessidades da planta estão satisfeitas (González, 1984; Sasaki, 1995). Porém, segundo Nikolaeva et al. (1986), o fósforo é mais rapidamente absorvido no estágio de perfilhamento, decrescendo perto do final da fase vegetativa. Após o florescimento, o fósforo é drenado rapidamente aos grãos, em até 75% do total absorvido pela planta (Perdomo et al., 1985; Sasaki, 1995).

O potássio é o macronutriente mais absorvido pela planta de arroz, mas apenas 10% do total absorvido se encontra nas partes reprodutivas, sendo que sua maior proporção se encontra em órgãos vegetativos (Hirata, 1995; Fornasieri Filho & Fornasieri, 1993; Perdomo et al., 1985; Malavolta, 1980).

O arroz apresenta baixa exigência em cálcio, o qual é absorvido do início ao fim do ciclo da planta, especificamente até a etapa de grão pastoso, sendo proporcionalmente o nutriente menos exportado (Kawasaki, 1995). Após o florescimento, o teor de cálcio aumenta nas folhas e colmos da planta, mas o aumento no teor é devido ao seu incremento na panícula (Fornasieri Filho & Fornasieri, 1993; Barbosa Filho, 1987; Perdomo et al., 1985; Malavolta, 1980).

As quantidades de magnésio necessárias à planta são ligeiramente inferiores às de cálcio, e a maior quantidade é absorvida a partir da fase reprodutiva. A maior concentração desse nutriente ocorre na palha, sendo que a incorporação dos restos vegetais devolve ao solo grande quantidade de magnésio, a semelhança do que ocorre

com o potássio (Fornasieri Filho & Fornasieri, 1993; Barbosa Filho, 1987; Perdomo et al., 1985; Malavolta, 1980).

As exigências quantitativas de enxofre pela planta de arroz são comparáveis às de fósforo, sendo seu consumo semelhante ao do nitrogênio, e após o florescimento o enxofre estocado nas folhas se transloca para as panículas (Suzuki, 1995; Fornasieri Filho & Fornasieri, 1993).

A quantidade de nutrientes extraída do solo pela cultura de arroz é muito variável e depende da quantidade de fitomassa seca produzida e seu teor na palha, que por sua vez varia segundo a disponibilidade de nutrientes no solo. Em solos com alto teor de matéria orgânica, a planta utiliza os nutrientes na sequência $N > K > P$ e em solos de média fertilidade, na sequência $K > N > P$ (Perdomo et al., 1985; Bastos, 1999).

As faixas de teores de macronutrientes na planta, consideradas adequadas para cultura do arroz, na época de perfilhamento, são, em g.kg^{-1} : N (40,0 - 48,0), P (2,5 - 4,0), K (25,0 - 35,0), Ca (7,5 - 10,0), Mg (5,0 - 7,0) e S (1,5 - 2,0) (Malavolta et al., 1997).

Bastos (1999), avaliando a nutrição mineral em cinco variedades cultivadas de arroz aos 30 dias após o transplântio, em diferentes classes de solos de várzea inundados, observou, as seguintes faixas de macronutrientes na planta (g.kg^{-1}): N (28,7 - 30,4), P (1,9 - 2,2), K (19,3 - 20,6), Ca (3,6 - 3,8), Mg (1,5 - 1,7) e S (3,2 - 3,8).

Entretanto, deve-se considerar que esses valores são indicadores gerais, podendo ser influenciados por condições de solo, clima e material genético (Malavolta et al., 1997).

Em concordância com o crescimento e desenvolvimento da planta de arroz (Figura 3), a fitomassa seca aumenta ao longo do seu ciclo, sendo que a extração de nutrientes e o metabolismo mostram grande variação acompanhando esse crescimento e desenvolvimento.

No período de crescimento vegetativo, os nutrientes N , P , K e S são absorvidos intensamente e acontece a síntese de proteínas na aceleração do perfilhamento e na extensão da área foliar. Também, tem-se o rápido incremento da fotossíntese. Durante a fase de maturação, antes do emborrachamento, a morfogênese da planta de arroz já está completa e os fotossintatos são acumulados nas panículas na forma de amido. Além

médio de nutrientes que representa a condição fisiológica da planta. A identificação do momento em que a planta precisa de cada nutriente permite, através da simulação, o estabelecimento de técnicas para o manejo racional da cultura ao longo do seu crescimento e desenvolvimento, principalmente em sistemas de produção sob irrigação (Murayama, 1995).

O teor de nutrientes da planta é um indicador do seu estado nutricional. As relações entre o rendimento de grãos e o teor de nutrientes na fitomassa na colheita variam em função do tipo de nutriente. O teor dos macronutrientes na planta pode ser classificado em deficiente, normal, adequado ou excessivo (Yoshida, 1981; Murayama, 1995) e na Tabela 2 se pode observar o valor desses teores críticos para a cultura de arroz.

Tabela 2. Teores deficientes, críticos, adequados e tóxicos dos macronutrientes (*M*) para a planta de arroz.

M	Parte da planta	Estádio fenológico ou DAE	Teor do nutriente (%)			
			D¹	C²	A³	E⁴
N	Folha	Panícula ⁵	<1,8	1,8 a 2,6	2,6 a 4,2	-
P	Parte aérea	75 DAE ⁶	<0,15	0,15 a 0,25	0,25 a 0,48	>0,48
K	Parte aérea	75 DAE	<1,0	1,0 a 1,5	1,5 a 4,0	>4
Ca	Parte aérea	100 DAE	<0,2	0,2 a 0,25	0,25 a 0,4	>0,4
Mg	Parte aérea	100 DAE	<0,12	0,12 a 0,17	0,17 a 0,3	>0,3
S	Folha	Perfilhamento	<0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,6	>0,6

1 Deficiente; 2 Crítico; 3 Adequado; 4 Excesso; 5 Diferenciação da panícula; 6 Dias após a emergência.
Fonte: Adaptado de Fageria (1984).

Muitos estudos relacionam a extração de nutrientes com o rendimento obtido (Tabela 3), o que proporciona os elementos mínimos necessários para sua reposição através da aplicação de fertilizantes. Em termos de caracterização, a curva de extração de nutrientes pela planta varia junto às condições de crescimento e desenvolvimento da planta de arroz e apresenta uma determinada forma para cada tipo de nutriente.

Baseando-se nesse fato, Murayama (1995) relata que os macronutrientes podem ser classificados em três grupos: (1): *N, P e S*; (2): *K e Ca*; e (3): *Mg*.

Os nutrientes referentes ao caso 1 (*N, P e S*) são rapidamente absorvidos pela planta de arroz ao longo do seu ciclo, e a maior parte do acúmulo ocorre até o início do emborrachamento, sendo drenados da palha para a panícula na fase de maturação.

Os nutrientes referentes ao caso 2 (*K e Ca*) são absorvidos ao longo do seu ciclo, sendo que a maior parte do acúmulo ocorre até da fase de maturação. O dreno para as panículas é mínimo.

O acúmulo de *Mg* (caso 3) ocorre principalmente durante o período entre o início de formação da panícula e o emborrachamento.

Tabela 3. Extração dos macronutrientes na cultura de arroz em função do rendimento de grãos (R, kg.ha⁻¹).

R (kg.ha ⁻¹)	Macronutriente (kg.ha ⁻¹)						Referência	Observação
	N	P	K	Ca	Mg	S		
3226	83,6	13,6	74,8	17,0	7,7	9,8	Furlani et al. (1977)	Arroz irrigado. Acúmulo na parte aérea na época de colheita.
3116	82,8	14,6	119,2	22,5	7,7	11,8	Furlani et al. (1977)	Arroz irrigado. Acúmulo na parte aérea na época de colheita.
3307	83,0	13,7	90,5	23,2	7,3	10,6	Furlani et al. (1977)	Arroz irrigado. Acúmulo na parte aérea na época de colheita.
4521	83,3	11,5	117,8	-	-	-	Ohno & Marur (1977)	Arroz de sequeiro. Acúmulo na parte aérea na época de colheita. Londrina, PR.
3229	73,6	7,5	79,1	-	-	-	Ohno & Marur (1977)	Arroz de sequeiro. Acúmulo na parte aérea na época de colheita. Ponta Grossa, PR.
1000 ¹	47,0	7,5	34,0	5,5	4,5	-	Fageria & Souza (1995)	Arroz de sequeiro. Acúmulo na parte aérea na época de colheita.
1684	71,0	9,0	56,0	7,7	6,9	-	Fageria & Souza (1995)	Arroz de sequeiro. Acúmulo na parte aérea na época de colheita.
2117	116,0	14,0	76,0	10,8	9,4	-	Fageria & Souza (1995)	Arroz de sequeiro. Acúmulo na parte aérea na época de colheita.
2104	141,0	14,0	81,0	14,8	11,4	-	Fageria & Souza (1995)	Arroz de sequeiro. Acúmulo na parte aérea na época de colheita.
1000 ¹	22,5	5,0	23,0	4,0	4,6	-	Fageria (1999)	Arroz irrigado. Acúmulo na parte aérea na época de colheita.

¹ Extração por tonelada de grãos

A produção de fitomassa seca é muito lenta nos primeiros 30-40 dias de vida da planta de arroz, correspondendo, em muitos casos, a menos do 3% do total produzido. Com o início do perfilhamento e o crescimento de outras partes da planta, o acúmulo de fitomassa seca é muito rápido, mostrando ligeira redução nesse acúmulo por ocasião do

final do estágio de perfilhamento máximo (V_4) e durante o estágio de maturação do grão (M_{10}) (Fernández et al., 1985).

A quantidade de fitomassa seca varia em função da variedade cultivada, de fatores ambientais e da disponibilidade de nutrientes, mas o padrão de acúmulo é semelhante em quase todos os materiais de arroz. A quinta parte da fitomassa seca total é acumulada nos estádios V_1 , V_2 e V_3 ; a metade é atingida até a etapa de florescimento (V_1 - R_6) e a outra metade durante a formação do grão (M_8 - M_{10}). Em variedades cultivadas de alto rendimento, aproximadamente a metade da fitomassa seca total encontra-se nos grãos, tendo-se como resultado um índice de colheita de 0,5 (Fernández et al., 1985).

Usualmente, os modelos de simulação do rendimento potencial das culturas utilizam vários atributos da planta relacionados com a produção de fitomassa seca, tais como a área foliar e o crescimento e fenologia (Yin, 1996).

Durante o crescimento e desenvolvimento da cultura, a extração de nutrientes não se faz nas mesmas quantidades durante as suas diferentes etapas, e a curva que descreve a marcha de absorção (extração em função do tempo) é em geral uma sigmóide (Malavolta, 1980).

2.3 Modelagem e modelos matemáticos

2.3.1 Termos e definições

Modelo é definido como a representação matemática de um sistema ou um processo, enquanto que modelagem é o processo de desenvolvimento dessa representação. A simulação inclui os processos necessários para a operacionalização do modelo ou a solução do modelo visando simular o que acontece no sistema (De Wit, 1978).

O sistema é um conjunto de componentes e suas inter-relações, que são agrupados com o objetivo de estudar alguma parte do mundo real, sendo que a seleção desses componentes depende dos objetivos do estudo. Modelos típicos definem a cultura e a rizosfera como componentes que interagem no sistema e que são afetados pelas condições climáticas e as práticas de manejo (De Wit, 1978; Jones et al., 1987).

As culturas são sistemas, e como tais podem se dividir em níveis hierárquicos, para cada um dos quais têm sido desenvolvidos vários tipos de modelos. Assim, antes de se propor um modelo, deve-se definir seu nível hierárquico de utilização. Ainda, um sistema de contorno se refere à abstração dos limites dos componentes do sistema (Jones et al., 1987).

Os parâmetros são componentes do modelo usualmente constantes ao longo do tempo. Por exemplo, os parâmetros podem definir a resposta funcional da fotossíntese à luz, a resistência do solo à densidade de fluxo de água, a resposta funcional da variação temporal do índice de área foliar e a perda de água pela planta através do processo evapotranspiratório. A distinção entre parâmetro e entrada nem sempre é clara. Usualmente, as entradas são diretamente dependentes do tempo, enquanto que os parâmetros são constantes ou dependem do estado do sistema, mas não necessariamente do tempo (Jones et al., 1987).

As variáveis de estado são quantidades que descrevem as condições dos componentes no sistema e podem mudar com o tempo assim como os componentes do sistema interagem com o meio. Se as variáveis de estado mudam no tempo, os modelos são dinâmicos. Por exemplo, o conteúdo de água no solo e a biomassa da cultura são duas variáveis de estado que mudam com o tempo, na maioria dos modelos de culturas. As variáveis de estado desses modelos têm muita importância porque essas são as características dinâmicas da cultura de interesse do modelador (De Wit, 1978; Jones et al., 1987).

As inter-relações entre os componentes e o sistema, e algumas vezes entre variáveis de estado no sistema, ocorrem como resultado de vários processos. Por exemplo, a biomassa de uma cultura, variável de estado, muda como resultado dos processos de fotossíntese e respiração; o conteúdo resultante da chuva ou da evapotranspiração. Assim, pode-se dizer que um modelo é um conjunto de relações matemáticas que descrevem as mudanças nas variáveis de estado como resultado dos diferentes processos que ocorrem nesse sistema (De Wit, 1978; Jones et al., 1987).

2.3.2 Modelos de simulação

Em termos gerais, os modelos de simulação são utilizados para: (i) verificar teorias e testar hipóteses; (ii) melhorar o conhecimento sobre determinado processo, alimentando bases de dados com as informações obtidas, e (iii) fazer estimativas do rendimento de grãos (Munakata, 1995; Boote et al., 1996).

Segundo Munakata (1995), os estudos de simulação de crescimento das culturas podem ser definidos em duas linhas: (i) aquela que considera a estrutura do dossel da planta (características para a interceptação da luz) e (ii) a dinâmica da produção de fitomassa seca (crescimento).

Em condições favoráveis ao crescimento, os processos fisiológicos e o rendimento potencial das culturas são determinados principalmente pelas características varietais e por variáveis climáticas como temperatura e radiação. Em outras palavras, tem-se que a capacidade da planta de produzir fitomassa seca está diretamente relacionada com a quantidade de energia luminosa disponível e com a capacidade de aproveitamento dessa energia. Esse fato torna importante a análise do crescimento e desenvolvimento da cultura em diferentes situações pois significa que o potencial de rendimento das culturas difere entre locais e anos e entre épocas no mesmo local (Kropff et al., 1995).

Os modelos de simulação para culturas têm sido usados para quantificar o potencial de rendimento em diferentes ambientes e, geralmente, descrevem o desenvolvimento, o crescimento e o rendimento da cultura em áreas homogêneas e solos submetidos a determinadas condições climáticas (Jones et al., 1987; Kropff et al., 1995).

Para estimar alguns índices fisiológicos, faz-se necessário conhecer a variação temporal da fitomassa seca e do índice de área foliar. Além desses índices relacionados à cultura, fatores climáticos como a radiação e a temperatura devem ser consideradas. Em outras palavras, o rendimento depende do balanço de energia ao nível do dossel da cultura, que por sua vez, está correlacionado com a temperatura média do ar (Whisler et al., 1986; Pereira & Machado, 1987; Goudriaan & Laar, 1994).

A modelagem matemática procura representar a interação dos fatores ambientais com os da planta, permitindo o estudo e previsão mais detalhados dos processos de

interesse. O ideal é formular um modelo suficientemente complexo para descrever o fenômeno, através dos dados originais sem, não entanto, dificultar sua utilização prática (Pereira & Machado, 1987). Por outro lado, todo modelo matemático é a simplificação do sistema a ser estudado e não pode contemplar todas as variáveis existentes, o que resulta numa previsão não exata da realidade (Penning de Vries, 1987).

Para o uso de modelos matemáticos, torna-se necessária a determinação de seus parâmetros empíricos através de experimentação (necessidade de várias amostragens), o que ocasiona interferência na população restante. Na análise quantitativa de crescimento de comunidades vegetais, os intervalos de amostragem mais utilizados variam entre 7 e 14 dias (Pereira & Machado, 1987). Portanto, o tamanho dos experimentos deve ser em função do número de amostragens necessárias.

2.3.3 Modelagem na cultura de arroz

O padrão básico dos modelos clássicos de crescimento tem sua base em resultados experimentais e fundamenta-se no fato do crescimento e desenvolvimento de um organismo, acúmulo de fitomassa seca total (*FST*), no caso das plantas, aumentar exponencialmente com o tempo durante as etapas iniciais. Observando esse fato, Blackman (1919) estudou o crescimento de plantas utilizando a equação (9).

$$\frac{dFST}{dt} = g \cdot FST \quad (9)$$

em que g se refere ao coeficiente (d^{-1}) de proporcionalidade do modelo.

Observa-se que o modelo de Blackman (1919) considera que a taxa de crescimento da planta é proporcional à massa da planta. O modelo é válido para os estádios iniciais de crescimento em condições adequadas de nutrição. Ainda, o modelo expressa o crescimento da planta como sendo sempre contínuo, enquanto que o crescimento da planta é inicialmente lento.

Segundo Munakata (1995), a curva sigmoidal de crescimento tem sido expressa por alguns autores usando a curva logística de Verhulst-Pearl, conforme a equação (10):

$$\frac{dFST}{dt} = \epsilon \cdot FST \cdot (1 - FST) \quad (10)$$

em que $\bar{e}$ ($\text{ha.d}^{-1}\text{kg}^{-1}$) e $\bar{e}$ (kg.ha^{-1}) são parâmetros empíricos. O termo $\bar{e}(\bar{e}-FST)$ decresce proporcionalmente a FST e supõe-se que $\bar{e}$ está constantemente em equilíbrio.

Em termos de nutrição mineral de plantas, geralmente a modelagem desse processo é feita levando-se em consideração a relação entre quantidade de fertilizante e rendimento de grãos de arroz. Essa metodologia preconiza o aumento do rendimento conforme se aumenta a quantidade de fertilizante aplicado, até se atingir um valor máximo de rendimento.

Ao longo do crescimento e desenvolvimento da cultura, a extração de nutrientes é feita em quantidades variáveis e em função do estágio da planta. A curva que melhor descreve a marcha de absorção é do tipo sigmóide. Nos estádios iniciais, a absorção dos nutrientes é baixa, segue-se de um período em que a quantidade absorvida aumenta bastante, sendo descrita por uma curva que aparentemente se aproxima de uma reta. No período final, em que a planta está madura, a absorção volta a ser muito baixa ou nula (Malavolta, 1980).

Nessa mesma linha de raciocínio, Dourado Neto (1999) propõe modelos cosenoidais para expressar a forma sigmoidal de crescimento de uma planta. A vantagem desses modelos é a expressão matemática da caracterização geral de crescimento da cultura.

Geralmente, em agricultura os modelos têm sido usados para a simulação do crescimento da planta e para a previsão do rendimento. A relação funcional entre crescimento e desenvolvimento relativo, em termos de graus-dia, e fenologia e variação temporal do índice de área foliar, têm sido comumente utilizadas para essa finalidade (Yin, 1996; Dourado Neto, 1999).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento e tipo de solo

O experimento foi conduzido em área de várzea do Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP, em Piracicaba-SP, 22° 12' latitude Sul, 47° 38' longitude Oeste e 550 m de altitude, na margem direita do ribeirão Piracicamirim.

O solo da área é classificado como Gleissolo Eutrófico, horizonte A chernozêmico, de textura média a argilosa (Vidal-Torrado & Sparovek², 1993), que corresponde a *Gleysols* na nomenclatura da FAO (FAO, 1994) e *Humic Haplaquept* na nomenclatura americana (ESTADOS UNIDOS, 1993).

A granulometria da área está descrita na Tabela 4 (Medeiros, 1995), cuja classe textural é semelhante à descrita por Vidal-Torrado & Sparovek² (1993).

Tabela 4. Granulometria e classe textural do solo localizado na várzea do Departamento de Produção Vegetal da ESALQ-USP. Piracicaba, SP.

Granulometria ¹	%
Areia ²	52,95
Silte ³	24,35
Argila ⁴	22,70
Classe Textural	Franco-argilo-arenoso

¹ Classe de diâmetros (mm); ² Areia: $0,050 < \phi < 2,000$; ³ Silte: $0,002 < \phi < 0,050$; ⁴ Argila: $\phi < 0,002$
Fonte: Medeiros (1995)

² VIDAL-TORRADO, P.; SPAROVEK, G. Mapa pedológico detalhado do Campus "Luiz de Queiroz". Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". 1993. (Não publicado)

3.2 Caracterização química do solo

O solo da área foi caracterizado utilizando técnicas de geoestatística, conforme metodologias descritas por Matheron (1971) e Vieira et al. (1983). A amostragem foi feita nos 7 ha da várzea na camada de 0,00 a 0,15m. Os atributos químicos caracterizados foram matéria orgânica (*MO*), fósforo (*P*), potássio (*K*), cálcio (*Ca*) e magnésio (*Mg*), sendo a análise química feita segundo metodologia descrita por Raij & Quaggio (1983) no laboratório do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo.

Após a aplicação de técnicas de análise exploratória de dados (Alves, 1987), de análise descritiva (Libardi et al., 1996) e da aplicação da teoria das variáveis regionalizadas, foram obtidos mapas de variabilidade espacial das variáveis anteriormente descritas, os quais caracterizam a área onde foi realizado o experimento (Figura 4).

Os mapas não apresentam informação referente aos teores de *N* e *S*. Para efeito de recomendação de adubação no Estado de São Paulo, a rotina não leva em consideração a estimativa do teor de nitrogênio na solução do solo, pelo fato de ser um elemento muito variável em função das condições ambientais.

As parcelas experimentais foram localizadas na região dos mapas compreendida entre as coordenadas de abscissa entre 300 e 350m e ordenada entre 10 e 50m. Observa-se (Figura 4) que nessa região o solo apresenta teores médios dos nutrientes caracterizados, principalmente cálcio e magnésio, sendo que o pH médio da solução na referida região foi 6,2.

Figura 4 - Variabilidade espacial de alguns atributos químicos do solo na área experimental.

3.3 Instalação do experimento

3.3.1 A variedade cultivada

A variedade cultivada de arroz utilizada foi IAC 103, caracterizada por ser de ciclo médio, alto rendimento, classe de grão longo fino e por apresentar susceptibilidade moderada à brusone.

A variedade cultivada IAC 103 é a denominação comercial à linhagem IAC 1282, a qual se originou do cruzamento entre as linhagens LI 84-124 e LI 82-227 realizado no Centro Experimental de Campinas em 1986. As populações segregantes desse cruzamento foram semeadas na Estação Experimental de Pindamonhangaba e submetidas a vários ciclos de seleção.

Em 1990, selecionou-se a progênie 8620-38-B-1-1 que, sob a denominação IAC 1282, foi incluída em ensaios de competição, mostrando adequado desempenho agrônomo e industrial (IAC, 2002). As principais características agrônômicas da variedade cultivada estão resumidas na Tabela 5.

Tabela 5. Características agrônômicas da variedade cultivada de arroz IAC 103.

Atributo	Característica
Altura média (cm)	95
Florescimento médio (dias)	87
Maturação média (dias)	130
Comprimento do grão (mm)	6,82
Largura do grão (mm)	2,07
Espessura do grão (mm)	1,76
Relação entre comprimento e largura	3,29
Massa de 1000 grãos (g)	25,4
Teor de amilose (%)	24,2

Estudos conduzidos pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), durante quatro anos, reportam resultados de mais de 20 experimentos com rendimento médio de 5056 kg.ha⁻¹ (IAC, 2002).

3.3.2 Semeadura

A semeadura foi realizada em 28 de setembro de 1999 de forma mecanizada, utilizando espaçamento de 0,34m, com 10 sementes por metro. A adubação na semeadura foi realizada com base nos resultados da análise de solos, a qual visou o máximo rendimento da cultura, conforme recomendações de adubação e calagem preconizadas no Boletim 100 do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC, 1997).

3.4 Sistema de irrigação

O sistema de irrigação utilizado foi por inundação, conduzindo a água em canais revestidos, desde a barragem, no ribeirão Piracicamirim, até a entrada das quadras, na várzea.

3.5 Manejo da água de irrigação

O manejo da água de irrigação foi feito conforme preconizado por Corrêa et al. (1997). Procedeu-se da seguinte maneira: (i) após a semeadura, foi realizada a inundação e posterior drenagem das quadras; (ii) desde a semeadura até a emergência das plântulas, foram realizadas irrigações regulares com intervalo de um dia; (iii) após a emergência, o manejo de água foi feito levando em consideração a altura da planta, permitindo a drenagem das quadras até que as plantas atingissem 0,15 m de altura; e (iv) quando as plantas apresentaram 0,15 m de altura, aproximadamente, deixou-se lâmina constante de água nas quadras, até o ponto de maturidade fisiológica, momento em que se procedeu a drenagem das quadras.

Garantiu-se a água durante todo o ciclo da cultura, especialmente no período correspondente entre os estádios de emborrachamento (R6) e de florescimento (R7), etapa de maior sensibilidade da cultura à deficiência hídrica.

3.6 Amostragens e determinações

Em cada época de avaliação, foram retiradas duas plantas por parcela, de um total de três parcelas, para mensuração da fitomassa seca (g.planta^{-1}) total e de cada compartimento (raiz, folha e colmo e panícula) da planta de arroz.

Posteriormente, das seis plantas foi retirada uma sub-amostra por compartimento para determinação dos teores (g.kg^{-1}) dos macronutrientes (N , P , K , Ca , Mg e S).

3.7 Avaliações

3.7.1 Fenologia da cultura

A fenologia da cultura foi acompanhada diariamente em locais predeterminados a partir da emergência das plantas, conforme metodologia descrita por Dario (1993). Cada estágio foi caracterizado quando 50% das plantas presentes evidenciaram a descrição previamente estipulada.

3.7.2 Índice de área foliar

O índice de área foliar na i -ésima época de amostragem foi determinado conforme a metodologia descrita por Yoshida (1981), estimando-se a área de cada folha (AF , m^2) através dos modelos empíricos descritos nas equações (11) (primeira e última amostragens) e (12) (amostragens feitas entre os extremos citados).

$$AF_i = 0.67.L_i.C_i \text{ [primeira } (i = 1) \text{ e última } (i = 10) \text{ amostragens]} \quad (11)$$

$$AF_i = 0,75.L_i.C_i \text{ [da segunda à penúltima amostragem: } 1 < i < 10] \quad (12)$$

em que L_i e C_i se referem à maior largura e comprimento da folha, respectivamente, na i -ésima época de amostragem.

Sendo assim, o índice de área foliar (IAF_i , $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) na i -ésima época de amostragem corresponde à integração da área foliar de todas as folhas da planta, conforme mostrado na aproximação descrita na equação (13).

$$IAF_i = \frac{DP \cdot \left(w \cdot \sum_{f=1}^{nf} L_{if} \cdot C_{if} \right)}{10000} \quad (13)$$

em que f se refere à f -ésima folha da planta, nf ao número total de folhas por planta, DP à densidade populacional de plantas (planta.ha⁻¹), e w ao fator de forma geométrica da folha da planta de arroz (adimensional) (se $i=1$ ou $i=10$, então $w = 0,67$) [equação (11)] (se $1 < i < 10$, então $w = 0,75$) [equação (12)].

Para efeito de ajuste do modelo proposto aos valores observados [equação (15)], visando a extrapolação dos resultados e facilidade de comparação com outras localidades, foi calculado o índice de área foliar relativo conforme equação (14).

$$IAFr_i = \frac{IAF_i}{IAF_{max}} \quad (14)$$

em que $IAFr_i$ se refere ao índice de área foliar relativo na i -ésima época de amostragem (adimensional), e IAF_{max} (m².m⁻²) ao índice de área foliar máximo observado.

$$\hat{IAF}_i = \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left[\sin \left(\frac{\mathbf{p} \cdot Dr_i}{Dr_m} + \frac{3 \cdot \mathbf{p}}{2} \right) + 1 \right] \right\}^b \quad (15)$$

em que IAF_i refere-se ao índice de área foliar estimado até a i -ésima época de amostragem e $\hat{a}$ se refere ao parâmetro empírico do modelo não linear proposto para estimar o índice de área foliar relativo determinado através de análise de regressão pelo

3.7.3 Fitomassa seca e acúmulo de macronutrientes

A determinação da fitomassa seca da planta foi realizada em 10 amostragens feitas ao longo do ciclo da cultura. Em cada época de amostragem foram consideradas 2 plantas por parcela, de um total de 3 parcelas e as plantas foram divididas em compartimentos (k_1 : raiz, k_2 : folha e colmo, e k_3 : panícula). Nas duas primeiras épocas de amostragem foi considerado um número maior de plantas (6 plantas por parcela) devido à pouca fitomassa até então produzida pela planta.

Após separação dos diferentes compartimentos, procedeu-se a lavagem em água corrente das raízes. Posteriormente, a massa dos diferentes órgãos foi secada em estufa de circulação de ar a 70°C durante 48 horas para se obter a fitomassa seca (FS ; g.planta⁻¹). Foi utilizada uma sub-amostra de cada compartimento da planta para a obtenção do teor de macronutrientes no laboratório de Análise de Plantas do Departamento de Solos e Nutrição Mineral de Plantas da ESALQ/USP.

A fitomassa seca da parte aérea na i -ésima época de amostragem (FS_{PAi}) foi calculada como sendo o somatório da fitomassa seca de folha e colmo (FS_{FCi}) e da panícula (FS_{Pi}), enquanto que a fitomassa seca total na i -ésima época de amostragem (FST_i) corresponde ao somatório da fitomassa seca da parte aérea e da raiz (FS_{Ri}), conforme mostrado nas equações (16) e (17), respectivamente.

$$FS_{PAi} = FS_{FCi} + FS_{Pi} \quad (16)$$

$$FST_i = FS_{PAi} + FS_{Ri} \quad (17)$$

A extração (E_{ji} ; kg.ha⁻¹) do j -ésimo macronutriente, até a i -ésima época de amostragem, foi calculada conforme a equação (18).

$$E_{ji} = \frac{FST_i \cdot M_{ji}}{1000} \quad (18)$$

Em que M_{ji} refere-se ao teor do j -ésimo nutriente (g.kg⁻¹) na i -ésima época de amostragem.

Com os dados de fitomassa seca total, foi calculada a fitomassa seca total relativa na i -ésima época de amostragem ($FSTr_i$) como sendo a razão entre a fitomassa seca total na i -ésima época de amostragem (FST_i) e a fitomassa seca total máxima (FST_{max}) observada ao longo do ciclo da cultura, conforme descrito na equação (19).

$$FSTr_i = \frac{FST_i}{FST_{max}} \quad (19)$$

O mesmo raciocínio foi utilizado para o cálculo da fitomassa seca relativa dos compartimentos da planta, conforme descrito na equação (20).

$$FSr_{ik} = \frac{FS_{ik}}{FS \max_k} \quad (20)$$

Por outro lado, tem-se que o teor médio do j -ésimo nutriente na planta inteira, na i -ésima época de amostragem (M_{ji} , g.kg⁻¹), foi calculado como sendo o produto do teor médio do nutriente nos nc compartimentos, ponderado pela fitomassa seca correspondente, conforme a equação (21).

$$M_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^{nc} M_{jki} \cdot FS_{ki}}{\sum_{k=1}^{nc} FS_{ki}} \quad (21)$$

Em seguida, ajustou-se um modelo linear aos onze pares de dados M_{ji} e Dr_i , (foi incluso o ponto de coordenada $M_{ji} = 0$, $Dr_i = 0$) com o objetivo de se estimar o teor médio do j -ésimo nutriente ($\hat{M}_{ji}$, g.kg⁻¹), na i -ésima época de amostragem, conforme mostrado na equação (22).

$$\hat{M}_{ji} = a_j + b_j \cdot Dr_i \quad (22)$$

em que a_j e b_j se referem aos parâmetros empíricos referentes ao j -ésimo macronutriente.

Aos onze pares de dados $FSTr_i$, equação (19), e Dr_i , equação (1), foi ajustado o modelo senoidal proposto no presente trabalho, obtendo-se a fitomassa seca total relativa estimada na i -ésima época de amostragem ($\hat{FSTr}_i$), conforme descrito na equação (23).

$$\hat{FSTr}_i = \left\{ \frac{1}{2} \left[\sin \left(\frac{\mathbf{p} \cdot Dr_i}{Drm} + \frac{3\mathbf{p}}{2} \right) + 1 \right] \right\}^a \quad (23)$$

Finalmente, a extração do j -ésimo nutriente, até a i -ésima época de amostragem, foi estimada conforme a equação (24).

$$\hat{E}_{ji} = \frac{FST \max \cdot \hat{FSTr}_i \cdot \hat{M}_{ji}}{1000} \quad (24)$$

A avaliação do ajuste do modelo proposto aos dados observados foi realizada através da análise comparativa entre a $FSTr_i$ (valores calculados) e a $\hat{FSTr}_i$ (valores estimados), tendo as seguintes hipóteses a serem testadas: $A = 0$, $B = 1$ e $r = 1$, quando comparados através de uma regressão linear (análise de comparação).

$$\hat{FSTr}_i = A + B.FSTr_i \quad (25)$$

A mesma análise comparativa foi realizada para a avaliação da extração do j -ésimo nutriente, até a i -ésima época de amostragem, conforme descrito na equação (26).

$$\hat{E}_{ji} = A + B.E_{ji} \quad (26)$$

A taxa de acúmulo de fitomassa seca total relativa foi estimada derivando a função original, equação (23), em função do desenvolvimento relativo, obtendo-se a equação (27).

$$\frac{d \hat{FSTr}_i}{dDr_i} = \frac{ap}{2.Drm} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left[\sin\left(\frac{p.Dr_i}{Drm} + \frac{3p}{2}\right) + 1 \right] \right\}^{(a-1)} \cdot \cos\left(\frac{p.Dr_i}{Drm} + \frac{3p}{2}\right) \quad (27)$$

Obtendo-se a segunda derivada, equação (28), pode-se determinar o ponto de máxima taxa de acúmulo de fitomassa seca total.

$$\frac{d^2 \hat{FSTr}_i}{dDr_i^2} = \frac{a}{2} \left(\frac{p}{Drm} \right)^2 \cdot \left\{ (a-1) \left[\frac{1}{2} \cdot \left[\sin\left(\frac{p.Dr_i}{Drm} + \frac{3p}{2}\right) + 1 \right] \right]^{a-2} \cdot \cos\left(\frac{p.Dr_i}{Drm} + \frac{3p}{2}\right) - \left[\frac{1}{2} \cdot \left[\sin\left(\frac{p.Dr_i}{Drm} + \frac{3p}{2}\right) + 1 \right] \right]^{a-1} \cdot \sin\left(\frac{p.Dr_i}{Drm} + \frac{3p}{2}\right) \right\} \quad (28)$$

3.7.4 Rendimento de grãos

Para a estimativa do rendimento de grão da cultura, foram colhidas as plantas das áreas úteis das parcelas experimentais. Os grãos foram pesados em balança com precisão de 1,0g e o massa obtida foi ajustada para 13% de umidade conforme a equação (29), utilizada por Silveira Filho (1992).

$$R_c = \frac{R_o \cdot (100 - U_o)}{(100 - U_c)} \quad (29)$$

em que R_c se refere ao rendimento do grão ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) com teor de água a base de massa corrigido para U_c (umidade padrão: 13%), e R_o ao rendimento do grão ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) com teor de água a base de massa U_o (%) (valor observado).

3.8 Monitoramento das condições climáticas

Durante a condução do experimento, foram diariamente monitorados as temperaturas mínima e máxima e a pluviometria, utilizando-se os dados da estação meteorológica da ESALQ/USP. A caracterização das condições climáticas no período experimental é mostrada na Figura 5.

Figura 5 - Condições climáticas no período em que foi realizado o experimento.

3.9 Desenvolvimento do modelo e simulação

Inúmeros estudos têm demonstrado que processos de acúmulo de fitomassa seca apresentam curvas de forma sigmóide (curvas em forma de “S”), com certa tendência à estabilização, desempenho bastante comum em biologia. Muitos modelos matemáticos apresentam tais características e são amplamente usados na análise descritiva de dados onde a curva de crescimento é norteada por considerações teóricas.

O ciclo da cultura foi caracterizado pela soma calórica ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$), conforme descrito na equação (4), e em termos de desenvolvimento e crescimento relativo (Dr), conforme descrito na equação (1).

Nesse sentido, e para o desenvolvimento dos modelos propostos, o primeiro passo foi a concepção de uma estrutura baseada em considerações teóricas inerentes ao crescimento e desenvolvimento e taxa de absorção de nutrientes pela cultura do arroz. Em seguida, foram formulados os modelos empíricos, onde, finalmente, os parâmetros empíricos foram estimados.

Os coeficientes empíricos foram determinados através de análise de regressão não linear, utilizando o método dos mínimos quadrados (minimização da soma dos quadrados dos desvios entre os valores observados e estimados) e o procedimento iterativo de Newton-Raphson.

3.9.1 Modelo proposto: fatos biológicos considerados

Para a elaboração do modelo, foram considerados fatos biológicos referentes ao processo de crescimento e desenvolvimento durante o ciclo da cultura de arroz.

No instante da emergência da planta ($Dr=0$), a fitomassa (raiz, folha e colmo, panícula e total) é desprezível e, conseqüentemente, a taxa de acúmulo é nula. O mesmo raciocínio é aplicado no caso do índice de área foliar, pois no instante da emergência a área foliar é desprezível, então, a taxa de aumento da mesma pode ser considerada nula. Assim, essa premissa é válida tanto para o acúmulo de fitomassa seca total e índice de área foliar, quanto para o acúmulo de fitomassa seca dos diferentes compartimentos da planta (Tabela 6 e Tabela 7, caso 1).

Dependendo da variável em estudo (índice de área foliar, fitomassa seca total ou os nc compartimentos da planta), o máximo valor atingido pela variável dependente pode ocorrer antes (índice de área foliar e fitomassa seca da folha e colmo) ou no (fitomassa seca total, fitomassa seca da raiz e fitomassa seca da panícula) ponto de maturidade fisiológica (Tabela 6 e Tabela 7, caso 2).

No ponto de maturidade fisiológica, o acúmulo de fitomassa seca total, bem como de raiz e de panícula, é máximo (Tabela 6, caso 3) e, conseqüentemente, a taxa de acúmulo é nula (Tabela 6, caso 4). Antes do ponto de maturidade fisiológica, o aumento do índice de área foliar e o acúmulo de fitomassa seca de folha e colmo, são máximos

(Tabela 7, caso 3) e, conseqüentemente, a taxa de aumento de IAF , ou de acúmulo de FST , FS_R ou FS_P , é nula (Tabela 7, caso 4).

Em termos de crescimento e desenvolvimento vegetal, existe ao longo do ciclo da cultura, um único ponto de máxima taxa de acúmulo de fitomassa e um único ponto de máxima taxa de aumento de índice de área foliar (Tabela 6 e Tabela 7, caso 5), bem como um período de taxas positivas e crescentes (Tabela 6 e Tabela 7, caso 6), positivas e decrescentes (Tabela 6 e Tabela 7, caso 7), e negativas (Tabela 7, caso 8) e decrescentes (Tabela 7, caso 9).

Para a cultura de arroz, a curva referente à variação temporal (t) do índice de área foliar (IAF), fitomassa seca (FS) e acúmulo de macronutrientes (M) apresenta forma sigmoideal (forma de “S”), fato amplamente demonstrado por inúmeros estudos (Malavolta, 1980).

Sendo assim, as seguintes relações são assumidas como válidas:

$$FS = FS(t) \quad (30)$$

$$M = M(t) \quad (31)$$

$$IAF = IAF(t) \quad (32)$$

O ciclo da cultura pode ser caracterizado em termos de graus-dia (GD) ou de crescimento e desenvolvimento relativo (Dr) da cultura, e conseqüentemente, a variação temporal do índice de área foliar (IAF), do acúmulo de fitomassa seca (FS) e nutrientes (M) na planta podem ser expressa conforme as equações (33), (34) e (35), respectivamente.

$$T = T(t) \Rightarrow GD = GD(T) \text{ ou } Dr = Dr(T) \therefore FS = FS(Dr) \quad (33)$$

$$T = T(t) \Rightarrow GD = GD(T) \text{ ou } Dr = Dr(T) \therefore M = M(Dr) \quad (34)$$

$$T = T(t) \Rightarrow GD = GD(T) \text{ ou } Dr = Dr(T) \therefore IAF = IAF(Dr) \quad (35)$$

Tabela 6. Assunções para obtenção do modelo referente à fitomassa seca relativa total, de raiz e de panícula ($Drm=1$).

Caso	Condição	Descrição
1	se $Dr = 0 \Rightarrow Y = 0$	No instante da emergência, a FS é desprezível.
2	se $Dr = 0 \Rightarrow \frac{dY}{dDr} = 0$	No instante da emergência, a taxa de acúmulo da FS é nula.
3	se $Dr = 1 \Rightarrow Y = 1$	No ponto de maturidade fisiológica, o acúmulo de FS é máximo (caso 3) e a sua taxa de acúmulo é nula (caso 4).
4	se $Dr = 1 \Rightarrow \frac{dY}{dDr} = 0$	
5	se $0 < Dr < 1 \Rightarrow \frac{d^2Y}{dDr^2} = 0$	Durante o ciclo da cultura, a variação temporal do acúmulo de fitomassa seca apresenta comportamento sigmoidal. Portanto, existe um único instante que a taxa de acúmulo de fitomassa seca é máxima (caso 5), bem como períodos em que apresentam taxa de acúmulo positiva e crescente (caso 6) e positiva e decrescente (caso 7).
6	se $0 < Dr < Dr \left(\frac{d^2Y}{dDr^2} = 0 \right) \Rightarrow \frac{d^2Y}{dDr^2} > 0$	
7	se $Dr \left(\frac{d^2Y}{dDr^2} = 0 \right) < Dr < 1 \Rightarrow \frac{d^2Y}{dDr^2} < 0$	

Y = Fitomassa seca relativa total (FS_{Tr}), ou Fitomassa seca relativa de raiz (FS_{Rr}) ou Fitomassa seca relativa de panícula (FS_{Pr}).

Tabela 7. Assunções para obtenção do modelo referente à fitomassa seca relativa de folha e colmo e ao índice de área foliar relativo ($0 < Drm < 1$).

Caso	Condição	Descrição
1	se $Dr = 0 \Rightarrow Y = 0$	No instante da emergência, tanto o IAF quanto a FS_{Pr} é desprezível.
2	se $Dr = 0 \Rightarrow \frac{dY}{dDr} = 0$	No instante da emergência, tanto a taxa de aumento do IAF quanto a taxa de acúmulo da FS_{Pr} é nula.
3	se $Dr = Drm \Rightarrow Y = 1$	Num determinado instante, tanto o IAF quanto a FS_{Pr} é máximo. O máximo índice de área foliar e a máxima fitomassa de folha e colmo são atingidos antes do ponto de maturidade fisiológica.
4	se $Dr = Drm \Rightarrow \frac{dY}{dDr} = 0$	Num determinado instante, tanto a taxa de aumento do IAF quanto a taxa de acúmulo FS_{Pr} é nula.
5	se $0 < Dr < 1 \Rightarrow \frac{d^2Y}{dDr^2} = 0$	Durante o ciclo da cultura, tanto há um ponto de máxima taxa de aumento de IAF quanto de acúmulo de FS_{Pr} .
6	se $0 < Dr < Dr \left(\frac{d^2Y}{dDr^2} = 0 \right) \Rightarrow \frac{d^2Y}{dDr^2} > 0$	Entre a emergência e o instante de máxima taxa de aumento de IAF ou de acúmulo de FS_{Pr} , a taxa de aumento de IAF ou de acúmulo de FS_{Pr} é positiva e crescente.
7	se $Dr \left(\frac{d^2Y}{dDr^2} = 0 \right) < Dr < Drm \Rightarrow \frac{d^2Y}{dDr^2} < 0$	Entre o instante de máxima taxa de aumento de IAF ou de acúmulo de FS_{Pr} e o instante que o valor de IAF ou de FS_{Pr} é máximo, a taxa de aumento de IAF ou de acúmulo de FS_{Pr} é positiva e decrescente.
8	se $Drm < Dr < 1 \Rightarrow \frac{dY}{dDr} < 0$	Entre o instante que o valor de IAF ou de FS_{Pr} é máximo e o ponto de maturidade fisiológica, a taxa de aumento de IAF ou de acúmulo de FS_{Pr} é negativa.
9	se $Drm < Dr < 1 \Rightarrow \frac{d^2Y}{dDr^2} < 0$	Entre o instante que o valor de IAF ou de FS_{Pr} é máximo e o ponto de maturidade fisiológica, a taxa de aumento de IAF ou de acúmulo de FS_{Pr} é decrescente.

Y = Fitomassa seca relativa (FS_{Pr}) ou índice de área foliar relativo (IAF).

3.9.2 Estrutura do modelo proposto

No intuito de propor uma equação que atenda as condições pré-estabelecidas (Tabela 6 e Tabela 7), obteve-se a seguinte estrutura do modelo:

$$Y = \left\{ \frac{1}{2} \left[\sin \left(\frac{\mathbf{p} \cdot Dr}{Drm} + \frac{3\mathbf{p}}{2} \right) + 1 \right] \right\} \quad (36)$$

em que Y se refere à variação temporal do índice de área foliar relativo ($IAFr$), ou da fitomassa seca total relativa ($FSTr$), ou da fitomassa seca relativa do k -ésimo compartimento da planta (FSr_k), Dr ao desenvolvimento relativo da cultura de arroz, e Drm ao valor do desenvolvimento relativo em que a variável dependente atinge valor máximo.

3.9.3 Modelo proposto

Para generalizar o modelo proposto, introduziu-se o coeficiente empírico $\mathbf{a}$ o qual corresponde ao fator de forma da curva de crescimento, podendo ser interpretado como o valor numérico que integra as inter-relações não controladas e não consideradas no processo, no intuito de extrapolar o resultado para outra localidade e interpolar a previsão entre dois intervalos de tempo quaisquer medidos.

$$Y = \left\{ \frac{1}{2} \left[\sin \left(\frac{\mathbf{p} \cdot Dr}{Drm} + \frac{3\mathbf{p}}{2} \right) + 1 \right] \right\}^{\mathbf{a}} \quad (\mathbf{a} \in \mathbb{R}/\mathbf{a} > 2) \quad (37)$$

3.10 Análise estatística

O experimento foi realizado utilizando delineamento em blocos casualizados com três repetições e dez tratamentos (épocas de amostragem), segundo o seguinte modelo:

$$Y_{ij} = \mathbf{m} + t_i + BL_b + \mathbf{e}_{ij} \quad (38)$$

em que o índice i se refere ao número de ordem dos tratamentos (época de amostragem) (i : 1 a 10), b ao número de ordem das repetições (b : 1 a 3), Y_{ij} ao valor observado da variável de interesse (FS ou IAF) referente à b -ésima repetição da i -ésima época de

amostragem, μ à média geral; t_i ao efeito da i -ésima época de amostragem; BL_b ao efeito do b -ésimo bloco (ou repetição), e e_{ij} ao erro aleatório atribuído à observação Y_{ij} . O esquema da análise da variância para esse modelo está descrito na Tabela 8.

A análise estatística referente à acurácia dos modelos foi realizada utilizando o programa computacional *Table Curve* (ambiente Windows), tendo-se como critérios o valor F, o coeficiente de correlação e a premissa de desempenho biológico.

Tabela 8. Esquema da análise da variância.

Causa da variação	Graus de liberdade ¹	Quadrado Médio	F
Época	$n-1=10-1=9$	V_1	V_1/V_3
Bloco	$B-1=3-1=2$	V_2	V_2/V_3
Erro	$n.B-n-B+1=n.B-n-B+1=18$	V_3	
Total	$n.B-1=10.3-1=29$		

1 n : número de épocas: 10. B : número de blocos: 3.

3.11 Procedimentos gerais para determinação do índice de área foliar e da fitomassa seca

A Figura 6 ilustra o fluxograma e resumo geral referentes ao procedimento para estimativa do índice de área foliar na cultura de arroz através da determinação do parâmetro de caracterização.

Os fluxogramas da Figura 7 e da Figura 8 ilustram os procedimentos gerais para a estimativa da fitomassa seca total, teor médio e extração de macronutriente na cultura de arroz através da determinação dos parâmetros de caracterização, referentes aos procedimentos simplificado e detalhado, respectivamente.

nf, DP, w, C_{if} , L_{if} e IAF_{MAX}	$T_{MIN\ q}, T_{MAX\ q}, T_{BI}, T_{BS}, \Delta t$ e GD_{pmf}
$IAF_i = \frac{DP \cdot \left(w \cdot \sum_{f=1}^{nf} L_{if} \cdot C_{if} \right)}{10000}$	se $T_{MIN\ q} < T_{BI}$ então $T_{MIN\ q} = T_{BI}$ e se $T_{MAX\ q} > T_{BS}$ então $T_{MAX\ q} = T_{BS}$ se $T_{MIN\ q} \geq T_{BI}$ e $T_{MAX\ q} \leq T_{BS}$ então $T_q = \frac{T_{MIN\ q} + T_{MAX\ q}}{2}$
$IAFr_i = \frac{IAF_i}{IAF_{MAX}}$	$Dr_i = \frac{\sum_{q=1}^i (T_q - T_{BI}) \Delta t}{GD_{pmf}}$
$\hat{IAFr}_i = \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{sen} \left(\frac{p \cdot Dr_i}{Drm} + \frac{3 \cdot p}{2} \right) + 1 \right] \right\}^b$	$e_i = IAFr_i - \hat{IAFr}_i$
$\hat{IAFr}_i = A + B \cdot IAFr_i$	
$\hat{a}$ (parâmetro de caracterização)	
☐ Dados de entrada	☐ Valores calculados
☐ Análise de comparação	☐ Resultado (parâmetros de caracterização para estimar o índice de área foliar)
Descrição [atributo a ser estimado]	Modelo [interpolação no tempo (q) e extrapolação no espaço (local)]
Índice de área foliar da cultura de arroz no q-ésimo dia após a emergência	$\hat{IAF}_q = IAF_{MAX} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{sen} \left(\frac{p \cdot Dr_q}{Drm} + \frac{3 \cdot p}{2} \right) + 1 \right] \right\}^b$

Figura 6 - Modelo para estimar o índice de área foliar da cultura de arroz.

$nc, FST_{MAX} \text{ e } FS_{ki}$	$T_{MIN\ q}, T_{MAX\ q}, T_{BI}, T_{BS}, \Delta t \text{ e } GD_{pmf}$	M_{jki}
$FST_i = \sum_{k=1}^{nc} FS_{ki}$	se $T_{MIN\ q} < T_{BI}$ então $T_{MIN\ q} = T_{BI}$ e se $T_{MAX\ q} > T_{BS}$ então $T_{MAX\ q} = T_{BS}$ se $T_{MIN\ q} \geq T_{BI}$ e $T_{MAX\ q} \leq T_{BS}$ então $T_q = \frac{T_{MIN\ q} + T_{MAX\ q}}{2}$	$M_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^{nc} M_{jki} \cdot FS_{ki}}{\sum_{k=1}^{nc} FS_{ki}}$
$FSTr_i = \frac{FST_i}{FST_{MAX}}$	$Dr_i = \frac{\sum_{q=1}^i (T_q - T_{BI}) \Delta t}{GD_{pmf}}$	
$\hat{FST}_i = \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{sen} \left(\frac{\mathbf{p} \cdot Dr_i}{Drm} + \frac{3 \cdot \mathbf{p}}{2} \right) + 1 \right] \right\}^a$	$\hat{M}_{ji} = a_j + b_j \cdot Dr_i$	$\mathbf{e}_i = FSTr_i - \hat{FST}_i$
$\hat{E}_{ji} = \frac{FST_{MAX} \cdot \hat{FST}_i \cdot \hat{M}_{ji}}{1000}$	$E_{ji} = \frac{FST_i \cdot M_{ji}}{1000}$	$\mathbf{e}_{ji} = E_{ji} - \hat{E}_{ji}$
$\hat{FSTr}_i = A + B \cdot FSTr_i$	$\hat{E}_{ji} = A_j + B_j \cdot E_{ji}$	
$\hat{a}, a_i \text{ e } b_i$ (parâmetros de caracterização)		
<div></div> Dados de entrada	<div></div> Valores calculados	<div></div> Análise de comparação
<div></div> Resultado (parâmetros de caracterização para estimar a fitomassa seca total, teor médio de macronutriente e extração de macronutriente)		
Descrição [atributo a ser estimado]	Modelo [interpolação no tempo (q) e extrapolação no espaço (local)]	
Fitomassa seca total da cultura de arroz no q-ésimo dia após a emergência	$\hat{FST}_q = FST_{MAX} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{sen} \left(\frac{\mathbf{p} \cdot Dr_q}{Drm} + \frac{3 \cdot \mathbf{p}}{2} \right) + 1 \right] \right\}^a$	
Teor médio do j-ésimo macronutriente na planta de arroz no q-ésimo dia após a emergência	$\hat{M}_{jq} = a_j + b_j \cdot Dr_q$	
Extração do j-ésimo macronutriente no q-ésimo dia após a emergência	$\hat{E}_{jq} = \frac{FST_{MAX} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{sen} \left(\frac{\mathbf{p} \cdot Dr_q}{Drm} + \frac{3 \cdot \mathbf{p}}{2} \right) + 1 \right] \right\}^a \cdot (a_j + b_j \cdot Dr_q)}{1000}$	

Figura 7 - Modelo SIMPLIFICADO para estimar a fitomassa seca total e a extração de macronutriente na cultura de arroz.

$nc, FST_{MAX}, FS_{ki} \text{ e } FS_{kMAX}$		$T_{MINq}, T_{MAXq}, T_{BI}, T_{BS}, \Delta t \text{ e } GD_{pmf}$	M_{jki}
$FST_i = \sum_{k=1}^{nc} FS_{ki}$	$FSr_{ki} = \frac{FS_{ki}}{FS_{kMAX}}$	se $T_{MINq} < T_{BI}$ então $T_{MINq} = T_{BI}$ e se $T_{MAXq} > T_{BS}$ então $T_{MAXq} = T_{BS}$ se $T_{MINq} \geq T_{BI}$ e $T_{MAXq} \leq T_{BS}$ então $T_q = \frac{T_{MINq} + T_{MAXq}}{2}$	$M_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^{nc} M_{jki} \cdot FS_{ki}}{\sum_{k=1}^{nc} FS_{ki}}$
$FSTr_i = \frac{FST_i}{FST_{MAX}}$	$\hat{FS}_{ki} = \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{sen} \left(\frac{p \cdot Dr_i}{Drm} + \frac{3p}{2} \right) \right] + 1 \right\}^{a_k}$	$Dr_i = \frac{\sum_{q=1}^t (T_q - T_{BI}) \Delta t}{GD_{pmf}}$	$E_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^{nc} FS_{ki} \cdot M_{jki}}{1000}$
	$\hat{FST}_i = \sum_{k=1}^{nc} \hat{FS}_{ki}$	$\hat{M}_{jki} = a_{jk} + b_{jk} \cdot Dr_i$	
	$e_{ki} = FSr_{ki} - \hat{FSr}_{ki}$	$\hat{E}_{jki} = \frac{\hat{FS}_{ki} \cdot \hat{M}_{jki}}{1000}$	$e_{jki} = E_{jki} - \hat{E}_{jki}$
	$e_i = FSTr_i - \hat{FSTr}_i$	$\hat{E}_{ji} = \sum_{k=1}^{nc} \hat{E}_{jki}$	$e_{ji} = E_{ji} - \hat{E}_{ji}$
$\hat{FS}_{ki} = A_k + B_k \cdot FS_{ki}$	$\hat{FSTr}_i = A + B \cdot FSTr_i$	$\hat{E}_{jki} = A_{jk} + B_{jk} \cdot E_{jki}$	$\hat{E}_{ji} = A_j + B_j \cdot E_{ji}$
$\hat{a}_k, a_{jk} \text{ e } b_{jk}$ (parâmetros de caracterização)			
☐ Dados de entrada	☐ Valores calculados	☐ Análise de comparação	☒ Resultado (parâmetros de caracterização para estimar a fitomassa seca total, teor médio de macronutriente e extração de macronutriente)
Descrição [atributo a ser estimado]	Modelo [interpolação no tempo (q) e extrapolação no espaço (local)]		
Fitomassa seca total da cultura de arroz no q-ésimo dia após a emergência	$\hat{FST}_q = FST_{MAX} \sum_{k=1}^{nc} \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{sen} \left(\frac{p \cdot Dr_q}{Drm_k} + \frac{3p}{2} \right) \right] + 1 \right\}^{a_k}$		
Teor médio do j-ésimo macronutriente na planta de arroz no q-ésimo dia após a emergência	$\hat{M}_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^{nc} (a_{jk} + b_{jk} \cdot Dr_q) \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{sen} \left(\frac{p \cdot Dr_q}{Drm_k} + \frac{3p}{2} \right) \right] + 1 \right\}^{a_k}}{\sum_{k=1}^{nc} \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{sen} \left(\frac{p \cdot Dr_q}{Drm_k} + \frac{3p}{2} \right) \right] + 1 \right\}^{a_k}}$		
Extração do j-ésimo macronutriente no q-ésimo dia após a emergência	$\hat{E}_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^{nc} \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{sen} \left(\frac{p \cdot Dr_q}{Drm_k} + \frac{3p}{2} \right) \right] + 1 \right\}^{a_k} \cdot \sum_{i=1}^{nc} (a_{jk} + b_{jk} \cdot Dr_q) \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{sen} \left(\frac{p \cdot Dr_q}{Drm_i} + \frac{3p}{2} \right) \right] + 1 \right\}^{a_i}}{\sum_{i=1}^{nc} \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{sen} \left(\frac{p \cdot Dr_q}{Drm_i} + \frac{3p}{2} \right) \right] + 1 \right\}^{a_i}}$		

Figura 8 - Modelo DETALHADO para estimar a fitomassa seca total e a extração de macronutriente na cultura de arroz.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fenologia da cultura

Os estádios fenológicos observados ao longo do ciclo da cultura estão apresentados na Tabela 9. A expressão desses acontecimentos foi semelhante, em termos de dias após a emergência, à caracterização descrita pelo Instituto Agrônômico (IAC, 2002).

Observou-se pequeno alongamento do período compreendido entre a emergência e o início do perfilhamento, fato devido às condições climáticas, principalmente às baixas temperaturas do ar e do solo ocorridas na época de semeadura. (Figura 9). Nesse sentido, Yoshida (1981) relata que a temperatura ótima de emergência e estabelecimento da plântula é de 25 a 30°C.

Tabela 9. Relação dos estádios fenológicos observados com graus-dia (*GD*), desenvolvimento relativo (*Dr*), dias após a semeadura (*DAS*) e dias após a emergência (*DAE*).

Estádio	GD	Dr	DAS	DAE
Plântula (V_0)	15	0,01	9	1
Quatro folhas (V_1)	204	0,11	22	14
Início do perfilhamento (V_2)	294	0,16	29	21
Perfilhamento pleno (V_3)	575	0,32	49	41
Elongação entrenós (V_4)	791	0,44	63	55
Início da panícula (R_5)	1021	0,56	77	69
Início do emborrachamento (R_6)	1258	0,69	91	83
Emissão da panícula (R_7)	1417	0,78	101	93
Grão pastoso (M_9)	1616	0,89	112	104
Ponto de maturidade fisiológica (M_{10})	1810	1,00	124	116

4.2 Índice de área foliar

4.2.1 Variação temporal do índice de área foliar

A área foliar da cultura apresentou variação temporal inicialmente lenta, seguida de forte crescimento a partir da formação dos perfilhos e queda por ocasião do início do Figura 9).

Figura 9 - Variação temporal do índice de área foliar observado (E: Emergência, PER: Perfilhamento, PAN: Panícula, EMB: emborrachamento, PMF: ponto de maturidade fisiológica).

Os valores observados de *IAF* são apresentados no Apêndice 1. Pode-se observar, na análise estatística (ao nível $\alpha = 5\%$) (Anexo A; Tabela 15), que a variação temporal do *IAF* foi estatisticamente igual nos primeiros estádios da cultura, iniciando-se a diferenciação a partir do estabelecimento do perfilhamento pleno.

Ainda, pode-se observar três períodos relevantes na variação temporal do *IAF*: (i) da plântula ao início do perfilhamento; (ii) do perfilhamento pleno ao emborrachamento; e (iii) do emborrachamento ao ponto de maturidade fisiológica.

O máximo valor do índice de área foliar ($IAF = 5,86 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$) foi observado por ocasião da emissão da panícula, com desenvolvimento relativo igual a 0,78 e $5,86 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$, aos 93 dias após a emergência, momento a partir do qual inicia a diminuição, devido à senescência das folhas pela translocação dos fotoassimilados à panícula.

Para Fageria (1984), em arroz irrigado o IAF aumenta com a idade da planta e com os níveis de fósforo, alcançando seu mais alto valor no florescimento, valores em torno de 5 a $6 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ entre os 85 a 100 dias após a semeadura. O aumento do IAF é devido ao aumento do número de perfilhos e aumento do tamanho das folhas. Resultados semelhantes têm sido observados por Pinheiro & Guimarães (1990) e Pinheiro (1999).

4.2.2 Modelagem da variação temporal do índice de área foliar

O modelo ajustado aos pares de dados $IAFr$ e Dr apresentou adequada aderência aos dados observados, conforme apresentado na Figura 10 e na Tabela 12, através dos valores do coeficiente de determinação e do teste de F . A relação entre os dados observados e os estimados pelo modelo é apresentada esquematicamente através de uma análise de comparação Figura 10.

Na Figura 6, apresenta-se o resumo do procedimento utilizado para a estimativa do IAF , e na Tabela 31 (Anexo D), a relação de equações, análise dimensional e restrições utilizadas no processo de modelagem e simulação.

Figura 10 - Variação temporal (a) e comparação (b) entre os valores calculados e estimados do índice de área foliar relativo ($IAFr$).

4.3 Fitomassa seca e acúmulo de macronutrientes

Os teores de macronutrientes observados nos *nc* compartimentos e parte aérea da planta são apresentados no Apêndice 2 (Tabela 33 e Tabela 34). Observou-se que o teor de todos os macronutrientes por unidade de fitomassa seca é decrescente, em todos os compartimentos da planta, com algumas exceções, como o caso do cálcio e o fósforo que apresentaram tendência constante.

A variação temporal do acúmulo de fitomassa seca da parte aérea da planta corresponde ao somatório da fitomassa seca de folha e colmo e panícula, conforme mostrado na Figura 11.

De forma semelhante, a variação temporal do acúmulo de fitomassa seca da planta corresponde ao somatório do acúmulo de fitomassa seca da parte aérea e da raiz, conforme pode ser observado na Figura 12.

Figura 11 - Variação temporal (*DAE*: dias após a emergência) do acúmulo fitomassa seca da parte aérea da planta e seus componentes.

Figura 12 - Variação temporal (*DAE*= dias após a emergência) do acúmulo da fitomassa seca na planta e seus componentes.

Observa-se nos resultados da análise de variância (Anexo A: Tabela 17, Tabela 19, Tabela 21, Tabela 23 e Tabela 25), pelo teste de F, que há diferença altamente significativa entre épocas de amostragem de fitomassa nos diferentes compartimentos da planta. Obviamente, essas diferenças devem se apresentar devido ao acúmulo de

fitomassa seca ao longo do ciclo da cultura. Observa-se nas mesmas tabelas que as diferenças entre blocos não foram significativas, mas apresentam-se mais acentuadas na variação temporal do acúmulo de fitomassa seca no compartimento folha e colmo.

Também, realizou-se a comparação de médias (todas contra todas) entre épocas de amostragem (Anexo A: Tabela 18, Tabela 20, Tabela 22, Tabela 24 e Tabela 26) no intuito de se determinar as épocas de acúmulo de fitomassa seca estatisticamente iguais ao nível $\alpha = 95\%$ ao nível de probabilidade. Em todos os casos, observa-se que os estádios iniciais da cultura (Plântula, Quatro folhas e Início do perfilhamento) apresentam-se iguais em termos de acúmulo de fitomassa seca, começando a se diferenciar a partir do estabelecimento do perfilhamento (Perfilhamento pleno).

A variação temporal da fitomassa seca da raiz apresentou forma sigmoideal (Figura 11), atingindo seu máximo por ocasião do início da fase de maturação (Grão leitoso; 90 a 100 DAE). Resultados diferentes foram observados por Fageria (1984), que relata que o crescimento máximo do sistema radicular do arroz acontece por ocasião do florescimento. No entanto, McClure & Harvey (1962) e Hurd (1968) relatam que, sob condições favoráveis, o crescimento das raízes continua até o estágio de maturação, coincidindo com os resultados observados.

Cabe salientar que no processo de amostragem de raízes, que consistiu em coletar o sistema radicular, observou-se perda de material vegetal no solo, o que não foi quantificado. Nesse sentido, deve-se usar essa informação observando-se a limitação referida.

No caso da variação temporal do acúmulo de fitomassa seca de folha e colmo, observa-se inicialmente, aumento lento das estruturas, aumento quase linear a partir do perfilhamento pleno (40 a 45 DAE) e acentuado a partir da emissão da panícula (60 DAE) até o grão pastoso (100 a 105 DAE). Em seguida, e até o ponto de maturidade fisiológica da cultura, observa-se forte queda devida, principalmente, à perda de folhas senescentes (Figura 11).

No caso da panícula, a curva da variação temporal do acúmulo de fitomassa apresentou tendência linear (Figura 11), com forte incremento durante um período de 23 dias, a partir de 90 DAE até o ponto de maturidade fisiológica (116 DAE).

Inicialmente, a curva sigmóide (Figura 12) da variação temporal do acúmulo de fitomassa seca da parte aérea [(folha e colmo) + panícula] é semelhante à observada na variação temporal do acúmulo de fitomassa seca de folha e colmo, pois, até o início da panícula, esse compartimento corresponde à parte aérea da planta.

A respeito do acúmulo de fitomassa seca total, verifica-se, pela comparação de médias (Anexo A: Tabela 18), crescimento lento até 40 a 50 dias após a emergência (no início do perfilhamento). Por ocasião da elongação dos entrenós(55 DAE), intensifica-se o acúmulo de fitomassa seca, observando-se o início da tendência sigmoidal no estágio correspondente à emissão da panícula. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Fageria (1984).

Como pode ser observado no Anexo A (Tabela 20), o acúmulo de fitomassa seca do sistema radicular é lento até o início do perfilhamento. Em seguida, há aumento do acúmulo de fitomassa até a planta atingir o estágio de perfilhamento pleno. Logo depois, o aumento de fitomassa é baixo até a elongação dos entrenós.

Conforme os resultados da comparação entre médias (Anexo A: Tabela 22), observa-se um padrão de acúmulo de fitomassa seca em folha e colmo até o início do perfilhamento, e forte aumento a partir da elongação dos entrenós. Finalmente, observa-se na mesma tabela que o acúmulo de fitomassa seca no compartimento folha e colmo no último estágio (ponto de maturidade fisiológica) foi semelhante ao observado por ocasião do início do emborrachamento.

Segundo os resultados da comparação de médias (Anexo A: Tabela 24), o acúmulo de fitomassa da panícula, até a emissão da folha bandeira, foi estatisticamente igual ($\alpha = 95\%$). Entre os estádios emissão da panícula e grão leitoso, o acúmulo de fitomassa seca é baixo e o aumento é diferente entre épocas de amostragem a partir do grão leitoso.

Pode-se observar no Anexo A (Tabela 26) que o acúmulo de fitomassa seca da parte aérea apresenta diferença entre épocas de amostragem a partir do início do perfilhamento, observando-se valores absolutos maiores a partir do início da panícula.

Na Tabela 10, pode-se observar os valores absolutos de extração de macronutrientes pela cultura e sua discussão é apresentada a seguir.

4.3.1 Procedimento simplificado para a estimativa do acúmulo de fitomassa seca e extração de macronutrientes

O procedimento simplificado permitiu a obtenção de modelos para: (i) a estimativa da fitomassa seca total da cultura no q -ésimo dia após a emergência; (ii) a estimativa do teor médio do j -ésimo macronutriente no q -ésimo dia após a emergência; e (iii) a extração do j -ésimo macronutriente no q -ésimo dia após a emergência. Na Figura 7 apresenta-se o resumo do procedimento utilizado para obter os referidos modelos.

4.3.1.1 Variação temporal da fitomassa seca total e da extração de nutrientes

A tendência da variação temporal do acúmulo de fitomassa seca total foi a esperada (Figura 12): crescimento inicial lento, período de rápido crescimento até atingir o máximo por ocasião do ponto de maturidade -se tendência à estabilização.

Os valores absolutos da variação temporal de fitomassa seca total e de extração de nutrientes calculados são apresentados na Tabela 10. Pode-se observar que até a quarta época de amostragem, o acúmulo de fitomassa seca é baixo, intensificando-se a partir do perfilhamento máximo. Na comparação de médias (Anexo A, Tabela 18), esse fato é distinguível ao nível $\alpha = 95\%$ de significância. Resultados de pesquisa, relatados por Fageria (1984), mostram resultados semelhantes em experimentos conduzidos sob irrigação e diferentes níveis de aplicação de fósforo, coincidindo o estágio de máximo perfilhamento com o início da intensificação do acúmulo de fitomassa seca.

O macronutriente mais extraído pela cultura foi o nitrogênio, seguido pelo potássio e o enxofre. Observa-se que a ordem de absorção dos macronutrientes primários foi $N > K > P$, enquanto que para os macronutrientes secundários, a ordem foi $S > Mg > Ca$ (Tabela 10).

Tabela 10. Fitomassa seca total (*FST*; kg.ha⁻¹) e extração dos macronutrientes (kg.ha⁻¹) (valores calculados).

<i>FST</i>	Extração de macronutriente					
	N	P	K	Ca	Mg	S
56	1	0	1	0	0	0
140	3	0	4	0	1	1
219	6	1	5	1	1	1
1429	32	3	38	5	3	7
3058	55	4	41	9	5	10
4674	59	9	79	9	9	23
6771	144	11	69	10	9	57
9150	136	20	147	19	17	59
10961	114	23	128	18	20	41
12116	125	22	95	18	22	48

De maneira geral, a ordem de absorção foi a seguinte: $N > K > S > P > Mg > Ca$. Segundo Fageria (1999), na cultura do arroz irrigado o acúmulo de macronutrientes ocorre na seguinte ordem: $K > N > P > Mg > Ca$, enquanto que a ordem observada no presente trabalho é citada pelo mesmo autor como sendo característica em arroz de sequeiro sob condições de solos do cerrado.

4.3.1.2 Modelagem e estimativa da variação temporal do acúmulo de fitomassa seca e da extração de macronutrientes

Observa-se, pela Figura 13, que o modelo senoidal proposto se ajustou satisfatoriamente aos dados calculados de fitomassa seca total relativa. A análise de comparação realizada entre a fitomassa seca total relativa calculada e a fitomassa seca total relativa estimada pelo modelo (Figura 13) demonstra a aderência da estimativa do modelo aos dados experimentais.

Figura 13 - Variação temporal (a) e comparação (b) entre os valores calculados e estimados de fitomassa seca total relativa ($FSTr$).

A estimativa da extração do j -ésimo macronutriente, no q -ésimo dia após a emergência pode ser observada na Figura 14. Em todos os casos, o modelo proposto estimou adequadamente a variação temporal da extração, sendo que a menor aderência foi observada na estimativa da extração de potássio (Figura 15).

Figura 14 - Variação temporal da extração de macronutrientes na cultura de arroz.

Figura 15 - Análise de comparação entre os valores calculados e estimados da extração ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) de macronutrientes na cultura de arroz.

4.3.1.3 Taxa de absorção de macronutrientes na planta

Para efeito prático, a taxa de absorção de macronutrientes é apresentada em função de dias após a emergência. Derivando-se a função original do modelo proposto, conforme descrito na equação (27), obteve-se a referida taxa, conforme mostrado na Figura 16.

Observa-se que a planta atingiu a máxima taxa de absorção de todos os macronutrientes no período correspondente à fase reprodutiva. O nitrogênio e o potássio foram mais extraídos no final do estágio de alongação dos entrenós, o cálcio e o magnésio no início de formação da panícula, e o fósforo e o enxofre por o emborrachamento.

Também, pode-se observar na mesma figura que os nutrientes *P*, *Ca*, *Mg* e *S* foram inicialmente absorvidos lentamente, contrário ao que aconteceu com o *N* e o *K*.

Figura 16 - Variação temporal da taxa de extração (T_e , $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) de macronutrientes.

Comparando os resultados observados com os apresentados por Murayama (1995), os estádios de máxima absorção diferem em termos de grupos de macronutrientes. Segundo o referido autor, *N*, *P* e *S* pertencem ao grupo de extração máxima por ocasião do emborrachamento, *K* e *Ca* no início da fase de maturação e *Mg* no início de formação da panícula, fato também observado no trabalho. Mesmo assim, o

referido autor relata que os padrões apresentados não necessariamente caracterizam a taxa de absorção de macronutrientes pela planta de arroz.

A extração estimada dos macronutrientes pela cultura de arroz pode ser definida em três grupos: (i) *N* e *K*, (ii) *S*, e (iii) *P*, *Ca* e *Mg* (Figura 17).

Figura 17 - Comparação da taxa de extração (Te , $\text{kg.ha}^{-1}.\text{d}^{-1}$) de macronutrientes.

Figura 18 - Variação temporal da taxa (Te , $\text{kg.ha}^{-1}.\text{d}^{-1}$) e aceleração (Ae , $\text{kg.ha}^{-1}.\text{d}^{-2}$) de extração de nitrogênio e potássio na cultura de arroz.

No intuito de se definir a melhor época de aplicação de *N* e *K* em cobertura, obteve-se a máxima taxa de extração desses nutrientes quando a aceleração de extração

foi nula. Para tal, igualou-se a zero a segunda derivada ($d^2Te/dDAE^2=0$) da função original [equação (28)] do modelo proposto (Figura 18).

Em ambos os casos, para efeito de adubação de cobertura, o fertilizante deve ser *aplicado até 60 DAE*, por ocasião do início de formação da panícula.

4.3.2 Procedimento detalhado para a estimativa do acúmulo de fitomassa seca e extração de macronutrientes

O procedimento detalhado (Figura 8) permitiu estimar a fitomassa seca total da planta e dos diferentes compartimentos e a extração de macronutrientes, utilizando os dados apresentados na Tabela 11.

4.3.2.1 Variação temporal da fitomassa seca e da extração de macronutrientes nos *nc* compartimentos e parte aérea da planta

Foi feito o cálculo da fitomassa seca relativa dos *nc* compartimentos da planta e da parte aérea, para cada época de amostragem, obtendo-se os resultados apresentados na Figura 19.

Figura 19 - Variação temporal da fitomassa seca relativa referente aos *nc* compartimentos e à parte aérea da planta.

Tabela 11. Valores absolutos (kg.ha^{-1}) da extração de macronutrientes observada nos *nc* compartimentos e parte aérea da planta.

	N	P	K	Ca	Mg	S
Raiz						
V ₀	0,3	0,0	0,5	0,1	0,1	0,2
V ₁	0,9	0,2	1,7	0,2	0,3	0,5
V ₂	1,7	0,2	2,5	0,3	0,3	0,8
V ₃	6,1	0,6	8,8	0,8	0,8	2,6
V ₄	7,1	0,8	4,9	1,5	1,3	4,1
R ₅	4,3	1,0	3,4	1,2	1,5	10,2
R ₆	13,1	2,2	4,6	2,6	1,6	16,4
R ₇	11,1	2,1	10,1	3,5	2,3	18,2
M ₉	9,2	2,1	6,7	2,1	2,1	16,2
M ₁₀	9,5	1,9	5,2	2,9	2,2	16,0
Folha e colmo						
V ₀	1,0	0,1	0,7	0,1	0,1	0,1
V ₁	2,5	0,2	1,9	0,4	0,2	0,3
V ₂	4,3	0,4	3,1	0,6	0,3	0,4
V ₃	27,4	2,3	29,9	4,7	2,3	3,2
V ₄	47,9	3,1	41,0	9,7	3,8	4,0
R ₅	54,5	8,5	79,2	8,5	7,7	5,9
R ₆	131,3	9,2	71,1	5,4	7,6	4,9
R ₇	117,3	16,5	141,6	15,0	13,6	12,2
M ₉	85,6	17,1	124,4	17,1	15,6	7,4
M ₁₀	64,8	9,5	82,1	20,7	11,7	5,0
Panícula						
V ₀	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
V ₁	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
V ₂	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
V ₃	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
V ₄	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
R ₅	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
R ₆	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
R ₇	4,6	0,9	3,5	0,1	0,5	0,4
M ₉	19,1	3,5	12,8	0,4	2,3	1,4
M ₁₀	50,4	11,0	22,1	0,5	6,2	3,4
Parte aérea						
V ₀	0,99	0,07	0,71	0,14	0,08	0,09
V ₁	2,47	0,22	1,94	0,38	0,19	0,26
V ₂	4,34	0,36	3,09	0,59	0,32	0,44
V ₃	27,35	2,31	29,88	4,72	2,31	3,19
V ₄	47,87	3,07	41,03	9,67	3,77	4,01
R ₅	54,49	8,47	79,16	8,47	7,73	5,89
R ₆	131,29	9,22	71,07	5,43	7,60	4,88
R ₇	121,96	50,72	277,84	17,64	32,34	26,46
M ₉	104,72	39,55	220,73	22,99	31,27	16,55
M ₁₀	115,25	41,56	200,55	39,49	35,33	16,63

4.3.2.2 Modelagem e estimativa da variação temporal do acúmulo de fitomassa seca e

Observa-se na Figura 20 que o modelo proposto representa adequadamente a variação temporal do acúmulo de fitomassa seca nos *nc* compartimentos e parte aérea da planta. No caso do acúmulo de *FS* da raiz e da panícula, a curva atinge o máximo e permanece praticamente constante.

No acompanhamento do acúmulo de fitomassa seca da raiz, foi observada leve queda no final do ciclo da cultura. Evidentemente, as perdas de raízes senescentes e o método de amostragem usado podem ter mascarado a maior queda da curva. No entanto, o modelo proposto foi pouco sensível a essa pequena queda da curva, observando-se acúmulo de fitomassa seca quase constante após o valor máximo ser atingido.

No caso do acúmulo de *FS* de folha e colmo, atinge-se um valor máximo e depois se observa o decréscimo gradual da curva, fato que pode ser atribuído à senescência das folhas. O modelo foi pouco sensível à queda da curva sigmóide mas evidencia-se a adequada aderência do modelo aos dados observados, tanto pela tendência observada ao longo do ciclo da cultura (Figura 20) quanto pela estreita relação mostrada na Figura 21.

Na Tabela 13 são apresentados os valores absolutos da extração de macronutrientes estimada pelo modelo proposto, nos *nc* compartimentos e parte aérea da planta. Observa-se na referida tabela que a estimativa de extração de potássio é maior tanto no compartimento folha e colmo, quanto na parte aérea (Folha e colmo + panícula).

Através do procedimento detalhado, observou-se a seguinte relação de extração de macronutrientes pela cultura: $K > N > P > S > Mg > Ca$, semelhante à relação descrita por Fageria (1984) para a cultura de arroz irrigado por inundação.

Figura 20 - Variação temporal do acúmulo de fitomassa seca nos *nc* compartimentos e na parte aérea da planta.

O melhor ajuste aos dados observados ocorreu com a variação temporal de FS da panícula, fato que pode ser conferido observando o resultado da avaliação estatística de modelo no resumo apresentado na Tabela 12.

A Tabela 12 apresenta o resumo da avaliação estatística dos modelos, e a Figura 21 ilustra a aderência do modelo aos dados observados.

Tabela 12. Coeficiente empírico e acurácia referentes aos modelos propostos.

Atributo	Coeficiente empírico	r^2	F
Índice de área foliar relativo: $IAFr(Dr)$	$\hat{a} = 1,796$	0,981	**
Fitomassa seca total relativa: $FSTr(Dr)$	$\hat{a} = 1,877$	0,985	**
Fitomassa seca relativa de raiz: $FSr_R(Dr)$	$\hat{a}_1 = 1,069$	0,998	**
Fitomassa seca relativa de folha e colmo: $FSr_{FC}(Dr)$	$\hat{a}_2 = 1,863$	0,964	**
Fitomassa seca relativa de panícula: $FSr_P(Dr)$	$\hat{a}_3 = 35,185$	0,999	**
Fitomassa seca relativa de parte aérea: $FSr_{PA}(Dr)$	$\hat{a}_{23} = 2,149$	0,980	**

** Altamente significativo ao nível $\hat{a} = 99\%$

Figura 21 - Comparação entre os valores calculados e estimados de fitomassa seca relativa dos *nc* compartimentos e da parte aérea da planta de arroz.

Observa-se, na Figura 21, a aderência entre os dados observados e os estimados pelo modelo, principalmente os relacionados com a fitomassa seca da raiz e da panícula, bem como a maior dispersão apresentada pela estimativa de fitomassa seca relativa de folha e colmo.

A extração de nutrientes nos *nc* compartimentos da planta foi variável em termos de ajuste aos dados observados. Ao nível de raiz, a estimativa de extração de potássio foi muito variável, enquanto que a estimativa de extração de *P* observa-se bastante adequada (Figura 22).

Tabela 13. Extração de macronutrientes (kg.ha^{-1}) nos *nc* compartimentos e parte aérea da planta (valores estimados pelo modelo proposto).

Estádio	N	P	K	Ca	Mg	S
Raiz						
V ₀	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
V ₁	0,63	0,08	0,94	0,11	0,13	0,31
V ₂	1,30	0,18	1,80	0,24	0,28	0,69
V ₃	4,47	0,63	4,84	0,85	0,94	2,93
V ₄	7,28	1,07	6,60	1,45	1,50	5,66
R ₅	9,75	1,50	7,44	2,04	1,97	9,22
R ₆	11,07	1,82	7,23	2,49	2,16	13,04
R ₇	11,09	1,93	6,64	2,64	2,10	15,38
M ₉	10,13	1,93	5,59	2,65	1,81	17,69
M ₁₀	8,37	1,79	4,44	2,47	1,37	19,00
Folha e colmo						
V ₀	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
V ₁	0,42	0,03	0,33	0,06	0,03	0,04
V ₂	1,52	0,12	1,21	0,22	0,12	0,15
V ₃	14,01	1,21	11,80	2,05	1,18	1,35
V ₄	34,47	3,20	30,53	5,16	3,12	3,22
R ₅	60,34	6,16	56,97	9,30	5,97	5,44
R ₆	79,21	9,08	81,18	12,68	8,75	6,77
R ₇	82,28	10,35	90,25	13,62	9,93	6,69
M ₉	73,86	10,69	89,99	12,90	10,20	5,49
M ₁₀	56,02	9,63	78,00	10,51	9,13	3,60
Panícula						
R ₇	1,6	0,3	1,2	0,0	0,2	0,1
M ₉	26,5	5,2	17,5	0,4	3,0	2,0
M ₁₀	40,6	8,7	18,5	0,5	5,3	2,6
Parte aérea						
V ₀	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
V ₁	0,19	0,01	0,14	0,03	0,01	0,02
V ₂	0,85	0,06	0,67	0,12	0,06	0,08
V ₃	11,66	1,15	10,37	1,72	1,07	1,18
V ₄	34,94	4,28	34,51	5,31	3,76	3,67
R ₅	72,35	11,20	81,12	11,43	9,35	7,98
R ₆	110,47	22,00	144,24	18,40	17,59	13,00
R ₇	126,35	30,19	185,88	22,00	23,51	15,69
M ₉	127,91	39,21	224,09	23,93	29,63	17,31
M ₁₀	109,65	44,31	236,57	22,56	32,62	16,61

Figura 22 - Variação temporal da extração (kg.ha⁻¹) de macronutrientes referente ao compartimento raiz da planta de arroz.

Trabalho realizado por Fageria (1991), em casa de vegetação, mostrou que a distribuição de *N* na planta de arroz foi de aproximadamente 15% nas raízes, 35% na parte aérea e 50% nos grãos. A distribuição de *P* foi de 10% nas raízes, 25% na parte aérea e 65% nos grãos. Com relação ao *K*, a distribuição ocorreu de forma inversa, sendo 81% translocado para a parte aérea, ficando aproximadamente 3% nas raízes e restante (16%) nos grãos.

No presente trabalho, a estimativa de macronutrientes no compartimento folha e colmo pelo procedimento detalhado apresentou desempenho adequado. Porém, o modelo subestimou os valores na faixa de ocorrência dos valores máximos (Figura 23).

Figura 23 - Variação temporal da extração (kg.ha⁻¹) de macronutrientes referente ao compartimento folha e colmo da planta de arroz.

No caso da panícula, o procedimento detalhado apresentou alto desempenho na estimativa da extração de macronutrientes, com exceção da estimativa do *K* e *S* que apresentam leve redução no final do ciclo da cultura (Figura 24).

Figura 24 - Variação temporal da extração (kg.ha⁻¹) de macronutrientes referente ao compartimento panícula da planta de arroz.

No caso da parte aérea da planta, o procedimento detalhado mostrou-se pouco adequado para a estimativa da extração de *Ca*. Porém, o desempenho observado na Figura 25 para a estimativa dos outros macronutrientes é adequado.

Figura 25 - Variação temporal da extração (kg.ha⁻¹) de macronutrientes referente à parte aérea da planta de arroz.

Levando em consideração os dados estimados de fitomassa seca nos *nc* compartimentos da planta, procedeu-se à estimativa da fitomassa seca total da planta e posterior comparação com a fitomassa seca total calculada, obtendo-se a curva apresentada na (26).

Figura 26 - Variação temporal (a) e comparação (b) entre os valores calculados e estimados de fitomassa seca total relativa (*FSTr*).

4.4 Rendimento obtido

No experimento, conforme amostragens feitas por ocasião da colheita, foram observados os componentes de rendimento e características apresentados na Tabela 14. O rendimento [equação (29)] foi estimado em 6143 kg.ha^{-1} , corrigindo-se a umidade do grão para 13%. Cabe salientar que o rendimento obtido foi superior ao relatado pelo IAC (2002) para a mesma variedade cultivada.

Tabela 14. Componentes do rendimento observados no experimento.

Componente	Valor
Número médio de grãos por panícula	134
Número médio de panículas por planta	9
Número médio de panículas por m^2	255
Umidade observada	22%

5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, e com o que foi discutido, pode-se concluir que:

- (i) Os modelos propostos para estimar o índice de área foliar, a fitomassa seca (total e dos diferentes compartimentos da planta) e a extração de macronutrientes (*N*, *P*, *K*, *Ca*, *Mg* e *S*) na cultura de arroz apresentaram adequado desempenho, os quais podem ser utilizados para definir ordem de grandeza das referidas variáveis; e
- (ii) A estimativa da máxima taxa de absorção de nitrogênio e potássio definiu que a aplicação desses macronutrientes deve ser efetuada até 56% do desenvolvimento relativo (equivalente a 60 *DAE* neste estudo) da cultura, por ocasião do início de formação da panícula.

ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela 15. Análise de variância relativa à variação temporal do índice de área foliar.

Causa da variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F
Época	9	16,566	245,82**
Bloco	2	0,3267	4,85 ^{ns}
Total	29		

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade ($\alpha=0,01$)

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($\alpha=0,05$)

ns: não significativo.

Tabela 16. Valores médios do índice de área foliar (*IAF*; $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) e teste de comparação de médias por época de amostragem.

Época de amostragem	<i>IAF</i>	i/j	Pr > T Ho: Média(i)=Média(j)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Plântula	0,01	1									
Quatro folhas	0,02	2	0,990								
Início do perfilhamento	0,05	3	0,9536	0,9632							
Perfilhamento pleno	0,83	4	0,2213	0,2237	0,2331						
Elongação dos entrenós	2,39	5	0,0363	0,0365	0,0372	0,0789					
Início de formação da panícula	3,84	6	0,0146	0,0146	0,0148	0,0233	0,0906				
Início do emborrachamento	4,77	7	0,0095	0,0095	0,0096	0,0138	0,0365	0,1838			
Emissão da panícula	5,86	8	0,0063	0,0063	0,0064	0,0085	0,0177	0,0494	0,1450		
Grão pastoso	5,08	9	0,0084	0,0084	0,0085	0,0119	0,0289	0,1171	0,5760	0,2371	
Ponto de maturidade fisiológica	4,56	10	0,0104	0,0100	0,0105	0,0153	0,0435	0,2619	0,6964	0,1086	0,3817

Tabela 17. Análise de variância referente ao acúmulo de fitomassa seca total.

Causa da variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F
Época	9	732,51	3335,33**
Bloco	2	0,6171	0,0867 ^{ns}
Total	29		

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade ($\alpha=0,01$)

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($\alpha=0,05$)

ns: não significativo.

Tabela 18. Valores médios de fitomassa seca total (*FST*; g.planta⁻¹) e teste de comparação de médias por época de amostragem.

Época de amostragem	FST	i/j	Pr > T Ho: Média(i)=Média(j)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Plântula	0,19	1									
Quatro folhas	0,47	2	0,6993								
Início do perfilhamento	0,74	3	0,4781	0,7157							
Perfilhamento pleno	5,98	4	0,0120	0,0133	0,0146						
Elongação dos entrenós	10,39	5	0,0039	0,0042	0,0044	0,0205					
Início da panícula	15,89	6	0,0017	0,0017	0,0018	0,0042	0,0133				
Início do emborrachamento	23,02	7	0,0008	0,0008	0,0008	0,0014	0,0026	0,0080			
Emissão da panícula	30,45	8	0,0004	0,0005	0,0005	0,0007	0,0010	0,0019	0,0074		
Grão pastoso	37,26	9	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0006	0,0009	0,0020	0,0088	
Ponto de maturidade fisiológica	41,19	10	0,0002	0,0002	0,0003	0,0003	0,0004	0,0006	0,0012	0,0036	0,0257

Tabela 19. Análise de variância relativa ao acúmulo de fitomassa seca da raiz.

Causa da variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F
Época	9	16,698	373,42**
Bloco	2	0,0467	0,3718 ^{ns}
Total	29		

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade ($\alpha=0,01$)

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($\alpha=0,05$)

ns: não significativo.

Tabela 20. Valores médios de fitomassa seca da raiz (FS_R ; g.planta⁻¹) e teste de comparação de médias por época de amostragem.

Época de amostragem	FS_R	i/j	Pr > T Ho: Média(i)=Média(j)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Plântula	0,080	1									
Quatro folhas	0,210	2	0,5383								
Início do perfilhamento	0,363	3	0,2498	0,4768							
Perfilhamento pleno	2,253	4	0,0065	0,0074	0,0086						
Elongação dos entrenós	2,380	5	0,0058	0,0066	0,0076	0,5476					
Início da panícula	3,376	6	0,0029	0,0031	0,0034	0,0238	0,0300				
Início do emborrachamento	4,576	7	0,0015	0,0016	0,0018	0,0057	0,0064	0,0210			
Emissão da panícula	5,473	8	0,0011	0,0011	0,0012	0,0030	0,0032	0,0070	0,0367		
Grão pastoso	5,996	9	0,0009	0,0009	0,0010	0,0022	0,0024	0,0045	0,0151	0,0975	
Ponto de maturidade fisiológica	5,863	10	0,0009	0,0010	0,0010	0,0024	0,0026	0,0050	0,0183	0,1579	0,5290

Tabela 21. Análise de variância relativa ao acúmulo de fitomassa seca de folha e colmo.

Causa da variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F
Época	9	304,082	1424,38**
Bloco	2	0,729	3,42 ^{ns}
Total	29		

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade ($\alpha=0,01$)

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($\alpha=0,05$)

ns: não significativo.

Tabela 22. Valores médios de fitomassa seca de folha e colmo (FS_{FC} ; g.planta⁻¹) e teste de comparação de médias por época de amostragem.

Época de amostragem	FS_{FC}	i/j	Pr > T Ho: Média(i)=Média(j)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Plântula	0,110	1									
Quatro folhas	0,260	2	0,8496								
Início do perfilhamento	0,383	3	0,7329	0,8759							
Perfilhamento pleno	3,733	4	0,0351	0,0380	0,0407						
Elongação dos entrenós	8,016	5	0,0077	0,0080	0,0082	0,0255					
Início da panícula	12,52	6	0,0031	0,0032	0,0033	0,0062	0,0231				
Início do emborrachamento	18,44	7	0,0014	0,0015	0,0015	0,0022	0,0044	0,0136			
Emissão da panícula	24,32	8	0,0008	0,0008	0,0008	0,0011	0,0018	0,0035	0,0138		
Grão pastoso	25,32	9	0,0008	0,0008	0,0008	0,0010	0,0016	0,0030	0,0101	0,2891	
Ponto de maturidade fisiológica	19,00	10	0,0014	0,0014	0,0014	0,0021	0,0040	0,0114	0,5106	0,0167	0,0120

Tabela 23. Análise de variância relativa ao acúmulo de fitomassa seca da pan

Causa da variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F
Época	9	116,807	2131,57**
Bloco	2	0,0746	1,36 ^{ns}
Total	29		

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade ($\alpha=0,01$)

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($\alpha=0,05$)

ns: não significativo.

Tabela 24. Valores médios de fitomassa seca da panícula (FS_P ; g.planta⁻¹) e teste de comparação de médias por época de amostragem.

Época de amostragem	FS_P	i/j	Pr > T Ho: Média(i)=Média(j)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Início de formação da panícula	0,000	1									
Início do emborrachamento	0,350	2	0,2572								
Folha bandeira	0,376	3	0,2334	0,9158							
Emissão da panícula	0,666	4	0,0961	0,2916	0,3232						
Grão leitoso	1,023	5	0,0444	0,0945	0,1012	0,2510					
Grão leitoso-farináceo	3,420	6	0,0042	0,0052	0,0053	0,0065	0,0086				
Grão farináceo	5,950	7	0,0014	0,0016	0,0016	0,0018	0,0020	0,0077			
Grão pastoso	12,44	8	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004	0,0006	0,0012		
Grão amarelo	12,86	9	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0006	0,0010	0,1959	
Ponto de maturidade fisiológica	16,33	10	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	0,0005	0,0033	0,0041

Tabela 25. Análise de variância relativa ao acúmulo de fitomassa seca da parte aérea da planta.

Causa da variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F
Época	9	533,933	2294,37**
Bloco	2	0,464	0,1652 ^{ns}
Total	29		

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade ($\alpha=0,01$)

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($\alpha=0,05$)

ns: não significativo.

Tabela 26. Valores médios de fitomassa seca da parte aérea (FS_{PA} ; g.planta⁻¹) da planta e teste de comparação de médias por época de amostragem.

Época de amostragem	FS	i/j	Pr > T Ho: Média(i)=Média(j)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Plântula	0,110	1									
Quatro folhas	0,262	2	0,8102								
Início do perfilhamento	0,383	3	0,6717	0,8475							
Perfilhamento pleno	3,734	4	0,0227	0,0247	0,0264						
Elongação dos entrenós	8,016	5	0,0049	0,0051	0,0053	0,0164					
Início da panícula	12,52	6	0,0020	0,0021	0,0021	0,0040	0,0149				
Início do emborrachamento	18,44	7	0,0009	0,0009	0,0009	0,0014	0,0028	0,0087			
Emissão da panícula	24,99	8	0,0005	0,0005	0,0005	0,0007	0,0011	0,0020	0,0071		
Grão pastoso	31,27	9	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0006	0,0009	0,0019	0,0078	
Ponto de maturidade fisiológica	35,33	10	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0006	0,0011	0,0029	0,0182

ANEXO B: ATRIBUTOS DO CLIMA

Tabela 27. Caracterização climática durante a execução do trabalho (os dados correspondem a períodos de 5 dias).

Dia Juliano	Data	R.Global cal.cm⁻².d⁻¹	Insolação h.d⁻¹	Precipitação mm	UR² %	T °C	ECA³ mm
268 ¹	24/09/99 ¹	612	12,5	0,0	70	20,0	6,1
273	29/09/99	372	7,5	0,0	65	21,4	5,3
278	04/10/99	137	0,0	0,0	69	21,6	5,0
283	09/10/99	635	11,1	11,0	75	21,4	5,7
288	14/10/99	471	8,8	0,0	70	22,1	5,2
293	19/10/99	528	9,5	11,5	79	23,6	5,8
298	24/10/99	615	10,5	3,4	71	21,2	4,8
303	29/10/99	640	11,2	2,6	79	21,9	4,4
308	03/11/99	409	5,3	0,0	62	22,4	5,2
313	08/11/99	471	7,9	9,2	73	23,7	5,7
318	13/11/99	298	1,2	17,0	87	20,5	4,4
323	18/11/99	576	11,8	0,0	71	20,7	6,0
328	23/11/99	486	9,2	13,8	76	23,1	5,9
333	28/11/99	700	12,0	12,1	63	24,2	6,2
338	03/12/99	429	4,4	13,0	70	25,3	7,6
343	08/12/99	444	4,8	74,9	82	24,8	6,0
348	13/12/99	156	0,1	84,3	88	23,6	5,9
353	18/12/99	710	11,9	2,3	70	24,0	5,2
358	23/12/99	384	3,3	45,8	72	25,3	6,4
363	28/12/99	676	11	41,7	81	24,9	6,1
2	02/01/00	115	0,0	60,9	86	24,2	5,9
7	07/01/00	454	5,1	88,3	94	23,7	3,0
12	12/01/00	291	4,8	21,8	80	25,6	5,5
17	17/01/00	528	9,5	21,3	87	26,3	5,9
22	22/01/00	661	10,6	0,0	75	25,6	6,9
27	27/01/00	267	5,7	36,8	80	24,6	6,1
32	01/02/00	240	1,4	27,8	78	22,4	5,2
37	06/02/00	537	7,8	5,0	82	25,6	6,1
42	11/02/00	309	0,9	43,9	90	24,4	4,8
47	16/02/00	428	4,9	36,5	90	24,6	5,7
52	21/02/00	624	10,1	2,8	83	22,5	5,1

¹ Final do período; ²UR = Umidade relativa do ar; ³ECA = Evaporação do tanque classe "A".

ANEXO C: DADOS OBSERVADOS

Tabela 28. Variação temporal do índice de área foliar e acúmulo de fitomassa seca nas diferentes partes da planta de arroz (valores observados).

DAE	Dr	IAFo	IAFr	Planta inteira		Raiz		Folha e colmo		Panícula		Parte aérea	
				FS	FSr	FS	FSr	FS	FSr	FS	FSr	FS	FSr
0	0,00	0,00	0,000	0	0,000	0	0,00	0	0,000	0	0,00	0	0,00
1	0,01	0,02	0,003	56	0,005	24	0,01	32	0,004	0	0,00	32	0,00
14	0,11	0,02	0,004	140	0,012	63	0,04	77	0,010	0	0,00	77	0,01
21	0,16	0,05	0,008	219	0,018	106	0,06	113	0,015	0	0,00	113	0,01
41	0,32	0,83	0,142	1429	0,118	331	0,19	1098	0,147	0	0,00	1098	0,11
55	0,44	2,40	0,409	3058	0,252	700	0,40	2358	0,317	0	0,00	2358	0,23
69	0,56	3,84	0,655	4674	0,386	992	0,56	3682	0,494	0	0,00	3682	0,35
83	0,69	4,77	0,814	6771	0,559	1346	0,76	5425	0,728	0	0,00	5425	0,52
93	0,78	5,86	1,000	9150	0,755	1609	0,91	7154	0,961	196	0,04	7350	0,71
104	0,89	5,08	0,867	10961	0,905	1764	1,00	7447	1,000	1750	0,36	9197	0,89
116	1,00	4,56	0,778	12116	1,000	1725	0,98	5588	0,750	4803	1,00	10391	1,00

DAE = Dias após a emergência; Dr = Desenvolvimento relativo; IAFo = Índice de área foliar observado; IAFr = Índice de área foliar relativo; FS = fitomassa seca; FSr = Fitomassa seca relativa.

ANEXO D: RELAÇÃO DE EQUAÇÕES, ANÁLISE DIMENSIONAL E RESTRIÇÕES APLICADAS

Tabela 29. Relação das equações, análise dimensional e restrições referentes ao PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO para estimativa da fitomassa seca total e teor médio e extração de macronutriente na cultura de arroz.

Modelo	Análise dimensional	Restrição	Observação
$T_q = \frac{T_{MIN_q} + T_{MAX_q}}{2}$	$^{\circ}C = ^{\circ}C + ^{\circ}C$	$T_{MIN_q} \geq T_{BI}$ e $T_{MAX_q} \leq T_{BS}$ (se $T_{MIN_q} < T_{BI}$ então $T_{MIN_q} = T_{BI}$ e se $T_{MAX_q} > T_{BS}$ então $T_{MAX_q} = T_{BS}$)	<u>Dias após a emergência (DAE):</u> q = 1: 1 DAE... ...q= 116: 116 DAE
$Dr_i = \frac{\sum_{q=1}^i (T_q - T_{BI}) \Delta t}{GD_{pmf}}$	adimensional = $\frac{^{\circ}C \cdot d}{^{\circ}C \cdot d}$	q = 1...116 (DAE) i = 1...10 (época de amostragem)	<u>Épocas de amostragem:</u> i = 1: plântula i = 2: quatro folhas i = 3: início do perfilhamento i = 4: perfilhamento pleno i = 5: alongação entrenós i = 6: início da panícula i = 7: início do emborrachamento i = 8: emissão da panícula i = 9: grão pastoso i = 10: pmf
$FST_i = \sum_{k=1}^{nc} FS_{ki}$	$\frac{kgFS}{ha} = \frac{kgFS}{ha} + \frac{kgFS}{ha} + \frac{kgFS}{ha}$	k = 1...3 (compartimento)	
$FSTr_i = \frac{FST_i}{FST_{MAX}}$	adimensional = $\frac{\frac{kgFS}{ha}}{\frac{kgFS_{MAX}}{ha}} = \frac{kgFS}{kgFS_{MAX}}$		
$\hat{FSTr}_i = \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{sen} \left(\frac{p \cdot Dr_i}{Drm} + \frac{3p}{2} \right) + 1 \right] \right\}^a$	$\frac{kgFS}{kgFS_{MAX}} = a \text{ dim ensional}$	$Drm = 1$	<u>Compartimentos:</u> k = 1: raiz k = 2: folha e colmo k = 3: panícula
$M_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^{nc} M_{jki} \cdot FS_{ki}}{\sum_{k=1}^{nc} FS_{ki}}$	$\frac{gJ}{kgFS} = \frac{\frac{gJ}{kgFS} \cdot \frac{kgFS}{ha}}{\frac{kgFS}{ha}}$	j = 1...6 (macronutriente)	<u>Macronutrientes:</u> j = 1: N j = 2: P j = 3: K j = 4: Ca j = 5: Mg j = 6: S
$\hat{M}_{ji} = a_j + b_j \cdot Dr_i$	$\frac{gJ}{kgFS} = \frac{gJ}{kgFS} + \frac{gJ}{kgFS} \cdot \frac{^{\circ}C \cdot d}{^{\circ}C \cdot d}$		
$\hat{E}_{ji} = \frac{FST_{MAX} \cdot \hat{FSTr}_i \cdot \hat{M}_{ji}}{1000}$	$\frac{kgJ}{ha} = \frac{\frac{kgFS_{MAX}}{ha} \cdot \frac{kgFS}{ha} \cdot \frac{gJ}{kgFS}}{\frac{1000gJ}{kgJ}}$		
$E_{ji} = \frac{FST_i \cdot M_{ji}}{1000}$	$\frac{kgJ}{ha} = \frac{kgFS}{ha} \cdot \frac{gJ}{kgFS}$		
$\hat{FSTr}_i = A + B \cdot FSTr_i$	adimensional = adimensional	A = 0	<u>Análise de comparação:</u> Ho: B = 1 e r = 1
$\hat{E}_{ji} = A_j + B_j \cdot E_{ji}$	$\frac{kgJ}{ha} = \frac{kgJ}{ha} + \text{adimensional} \cdot \frac{kgJ}{ha}$	A _j = 0	<u>Análise de comparação:</u> Ho: B _j = 1 e r _j = 1

Tabela 30. Relação das equações, análise dimensional e restrições referentes ao PROCEDIMENTO DETALHADO para estimativa da fitomassa seca total e teor médio e extração de macronutriente na cultura de arroz.

Modelo	Análise dimensional	Restrição	Observação
$T_q = \frac{T_{MINq} + T_{MAXq}}{2}$	$^{\circ}C = ^{\circ}C + ^{\circ}C$	$T_{MINq} \geq T_{BI}$ e $T_{MAXq} \leq T_{BS}$ (se $T_{MINq} < T_{BI}$ então $T_{MINq} = T_{BI}$ e se $T_{MAXq} > T_{BS}$ então $T_{MAXq} = T_{BS}$)	<u>Dias após a emergência (DAE):</u> q = 1: 1 DAE... ...q = 116: 116 DAE
$Dr_i = \frac{\sum_{q=1}^i (T_q - T_{BI}) \Delta t}{GD_{pmf}}$ e $FSTr_{ki} = \frac{FS_{ki}}{FS_{kMAX}}$	adimensional = $\frac{^{\circ}C \cdot d}{^{\circ}C \cdot d}$	$q = 1 \dots 116$ (DAE)	<u>Épocas de amostragem:</u> i = 1: plântula i = 2: quatro folhas i = 3: início do perfilhamento i = 4: perfilhamento pleno i = 5: alongação entrenós i = 6: início da panícula
$\hat{FS}_{ki} = \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{sen} \left(\frac{pDr_i}{Dr_m} + \frac{3p}{2} \right) + 1 \right] \right\}^{a_k}$	$\frac{kgFS_{FC}}{kgFS_{FCMAX}} = \frac{kgFS_{FC}}{kgFS_{FCMAX}}$	Se k = 1, tem-se $Dr_m = 1$ Se k = 2, tem-se $0 < Dr_m < 1$ Se k = 3, tem-se $Dr_m = 1$	i = 7: início do emborrachamento i = 8: emissão da panícula i = 9: grão pastoso i = 10: pmf
$FST_i = \sum_{k=1}^{nc} FS_{ki}$ e $\hat{FST}_i = \sum_{k=1}^{nc} \hat{FS}_{ki}$	$\frac{kgFS}{ha} = \frac{kgFS}{ha} + \frac{kgFS}{ha} + \frac{kgFS}{ha}$	k = 1...3 (compartimento)	
$FSTr_i = \frac{FST_i}{FST_{MAX}}$ e $\hat{FST}_i = \frac{\hat{FST}_i}{FST_{MAX}}$	adimensional = $\frac{kgFS}{ha}$		
$\hat{M}_{jki} = a_{jk} + b_{jk} \cdot Dr_i$	$\frac{gJ}{kgJ} = \frac{gJ}{kgFS} + \frac{gJ}{kgFS} \cdot \frac{^{\circ}C \cdot d}{^{\circ}C \cdot d}$	j = 1...6 (macronutriente)	
$\hat{E}_{jki} = \frac{\hat{FS}_{ki} \cdot \hat{M}_{jki}}{1000}$	$\frac{kgJ}{ha} = \frac{kgFS}{ha} \cdot \frac{gJ}{kgFS}$	i = 1...10 (época de amostragem)	<u>Compartimentos:</u> k = 1: raiz k = 2: folha e colmo k = 3: panícula
$\hat{E}_{ji} = \sum_{k=1}^{nc} \hat{E}_{jki}$	$\frac{kgJ}{ha} = \frac{kgJ}{ha} + \frac{kgJ}{ha} + \frac{kgJ}{ha}$		<u>Macronutrientes:</u> j = 1: N j = 2: P j = 3: K j = 4: Ca j = 5: Mg j = 6: S
$\hat{E}_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^{nc} FS_{ki} \cdot M_{jki}}{1000}$	$\frac{kgJ}{ha} = \frac{kgFS}{ha} \cdot \frac{gJ}{kgFS}$		
$\hat{FS}_{ki} = A_k + B_k \cdot FS_{ki}$	$\frac{kgFS}{ha} = \frac{kgFS}{ha} + \text{adimensional} \cdot \frac{kgFS}{ha}$	$A_k = 0$	<u>Análise de comparação:</u> Ho: $B_k = 1$ e $r_k = 1$
$\hat{FSTr}_i = A + B \cdot FSTr_i$	adimensional = adimensional	$A = 0$	<u>Análise de comparação:</u> Ho: B = 1 e r = 1
$\hat{E}_{jki} = A_{jk} + B_{jk} \cdot E_{jki}$	$\frac{kgJ}{ha} = \frac{kgJ}{ha} + \text{adimensional} \cdot \frac{kgJ}{ha}$	$A_{jk} = 0$	<u>Análise de comparação:</u> Ho: $B_{jk} = 1$ e $r_{jk} = 1$
$\hat{E}_{ji} = A_j + B_j \cdot E_{ji}$	$\frac{kgJ}{ha} = \frac{kgJ}{ha} + \text{adimensional} \cdot \frac{kgJ}{ha}$	$A_j = 0$	<u>Análise de comparação:</u> Ho: $B_j = 1$ e $r_j = 1$

Tabela 31. Relação das equações, análise dimensional e restrições referentes ao procedimento para estimativa do índice de área foliar na cultura de arroz.

Modelo	Análise dimensional	Restrição	Observação
$T_q = \frac{T_{MIN\ q} + T_{MAX\ q}}{2}$	$^{\circ}C = ^{\circ}C + ^{\circ}C$	$T_{MIN\ q} \geq T_{BI}$ e $T_{MAX\ q} \leq T_{BS}$ (se $T_{MIN\ q} < T_{BI}$ então $T_{MIN\ q} = T_{BI}$ e se $T_{MAX\ q} > T_{BS}$ então $T_{MAX\ q} = T_{BS}$)	<u>Dias após a emergência (DAE):</u> $q = 1: 1\ DAE...$ $...q = 116: 116\ DAE$
$Dr_i = \frac{\sum_{q=1}^i (T_q - T_{BI}) \Delta}{GD_{pmf}}$	adimensional = $\frac{^{\circ}C \cdot d}{^{\circ}C \cdot d}$	$q = 1...116\ (DAE)$	
$IAF_i = \frac{DP \cdot \left(w \cdot \sum_{j=1}^{nf} L_{ij} \cdot C_{ij} \right)}{10000}$	$\frac{m^2\ folha}{m^2\ solo} = \frac{\frac{planta\ m^2\ folha}{ha}}{\frac{10000m^2\ solo}{ha}}$	$i = 1...10$ (época de amostragem) Se $i = 1$ ou $i = 10$ então $w = 0,67$ Se $1 < i < 10$ então $w = 0,75$	<u>Épocas de amostragem:</u> $i = 1$: plântula $i = 2$: quatro folhas $i = 3$: início do perfilhamento $i = 4$: perfilhamento pleno $i = 5$: elongação entrenós $i = 6$: início da panícula $i = 7$: início do emborrachamento $i = 8$: emissão da panícula $i = 9$: grão pastoso $i = 10$: pmf
$IAFr_i = \frac{IAF_i}{IAF_{MAX}}$	adimensional = $\frac{\frac{m^2\ folha}{m^2\ solo}}{\frac{m^2\ folha}{m^2\ solo}}$		
$\hat{IAFr}_i = \left\{ \frac{1}{2} \left[\operatorname{sen} \left(\frac{p \cdot Dr_i}{Dr_m} + \frac{3p}{2} \right) + 1 \right] \right\}^p$	adimensional = adimensional	$0 < Dr_m < 1$	
$\hat{IAFr}_i = A + B \cdot IAFr_i$	adimensional = adimensional	$A = 0$	<u>Análise de comparação:</u> Ho: $B = 1$ e $r = 1$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, M.I.F. **Introdução à análise exploratória de dados**. Piracicaba: ESALQ, 1987. 40p.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DO ARROZ 2001. **Anais**, Santa Cruz do Sul: Gazeta, Grupo de Comunicações, 2001. 128p.
- ARIMA, Y. Uptake and accumulation of nitrogen. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. (Ed.) **Science of the rice plant**. Tokyo: Physiology, Food and Agricultural Policy Research Center, 1995.v.2, p.327-343.
- BARBOSA FILHO, M.P. **Nutrição e adubação do arroz: sequeiro e irrigado**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. 129p. (Boletim Técnico, 9).
- BASTOS, A.R.R. Nutrição mineral e produção de cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) em solos de várzea inundados. Lavras, 1999. 89p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Lavras.
- BLACKMAN, V.H. The compound interest law and plant growth. **Annals of Botany**, v.33, p.353-360, 1919.
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, v.88, p.704-716, 1996.
- CORRÊA, N.I.; CAICEDO, N.L.; FEDDES, R.A.; LOUZADA, J.A.S.; BELTRAME, L.F.S. Consumo de água na irrigação de arroz por inundação. **Lavoura Arrozeira**, v.50, n.432, p.3-8, 1997.
- CURI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D.P. Solos de várzea de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v.13, n.152, p.3-13, 1988.

- DARIO, G.J.A. Desenvolvimento das plantas e viabilidade das soqueiras de três cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) irrigado em diferentes épocas de semeadura. Piracicaba, 1993. 110p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- De WIT, C.T. **Simulation for assimilation, respiration, and transpiration of crops.** Wageningen: A Halsted Press Book; John Wiley, 1978, 140p.
- DOURADO-NETO, D. Modelos fitotécnicos referentes à cultura de milho. Piracicaba, 1999. 227p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Soil Survey Staff. Agency for International Development. Soil Management Support Services. **Keys to soil taxonomy.** Washington, 1993. 422p.
- FAGERIA, N.K. **Adubação e nutrição mineral da cultura do arroz** Rio de Janeiro: Campus; Goiânia: EMBRAPA, CNPAF, 1984. 341p.
- FAGERIA, N.K. Resposta de cultivares de arroz a fertilizante fosfatado me Latossolo Vermelho-Escuro do Brasil Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, p.63-67, 1991.
- FAGERIA, N.K.; SOUZA, N.P. Resposta das culturas de arroz e feijão em sucessão à adubação em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, p.359-368, 1995.
- FAGERIA, N.K. Nutrição mineral. In: VIEIRA, N.R.A.; SANTOS, A.B. dos; SANT'ANA, E.P. (Ed.) **A cultura do arroz no Brasil** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. cap.7, p.173-195.
- FAO. Faostat Agriculture Data. <http://apps.fao.org/page/collections?subset=agriculture> (17 de janeiro de 2002).
- FAO. Soil map of the world. Paris: UNESCO, 1994. Esc. 1:5.000.000.
- FERNANDEZ, F.; VERGARA, B.S.; YAPIT, N.; GARCIA, O. Crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. In: TASCÓN, J.E.; GARCIA, D.E. (Ed). **Arroz: investigación y producción.** Cali: CIAT, 1985. p.83-101.

- FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J.L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal: FUNEP, 1993. 221p.
- FURLANI, P.R.; BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; AZZINI, L.E.; SCHIMIDT, N.C. Composição química inorgânica de três cultivares de arroz. **Bragantia**, v.36, n.8, p.109-115, 1997.
- GAO, L.Z.; JIN, Z.Q.; HUANG, Y.; ZHANG, L.Z. Rice clock model - a computer model to simulate rice development. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.60, p.1-16, 1992.
- GARCIA, O.; YAPIT, N.; VERGARA, B.S.; FERNANDEZ, F. Crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. In: TASCON, J. E.; GARCIA, D. E. (Ed.) **Arroz: investigación y producción**. Cali: CIAT, 1985. p.83-102.
- GILMORE, E.; ROGERS, J. S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, n.50 p.611-615. 1958.
- GONZALEZ, J. Los macronutrientes en la nutrición de la planta de arroz. **Arroz**, Bogotá, v.33, n.329, p.34-44, mar./abr., 1984.
- GOUDRIAAN, J.; LAAR, H.H. van. **Modelling potential crop growth processes: textbook with exercises**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1994. 238p. (Current Issues in Production Ecology, 2).
- GUILHERME, L.R.C. Calagem e inundação em solos de várzea cultivadas com arroz: alterações em pH, nitrogênio, fósforo e enxofre. Lavras, 1990. 113p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Lavras.
- GUIMARÃES, E.P.; SANT'ANA, E.P. Sistemas de cultivo. In: VIEIRA, N.R.A.; SANTOS, A.B. dos; SANT'ANA, E.P. (Ed.) **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. cap.7, p.18-32.
- HIRATA, H. Absorption and metabolism of potassium. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. (Ed.) **Science of the rice plant**. Tokyo: Physiology, Food and Agricultural Policy Research Center, 1995. v.2, p.383-391.
- HURD, E.A. Growth of roots of seven varieties of spring wheat at high and low moisture levels. **Agronomy Journal**, v.60, p.201-205, 1968.

- INFELD, J.A.; SILVA, J.B. da; ASSIS, F.N. de. Uso de graus-dia para determinar a época de aplicação de nitrogênio na cultura do arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9, 1995. Campina Grande, PB. **Anais**. Campina Grande: SBA, 1995. p.66-67.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. IAC: busca na Homepage. <http://homepage.barao.iac.br/busca/busca.asp>. (29 de janeiro de 2002).
- INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. IAC. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.) 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim técnico 100).
- ISHIZUKA, Y. Physiology of the rice plants. **Advance in Agronomy**, v.23, p.241-315, 1971.
- JONES, J.W.; MISHOE, J.W.; BOOTE, K.J. **Introduction to simulation and modeling**. Gainesville: Food and Fertilizer Technology Center, 1987. 18p. (Technical Bulletin, 100).
- KAWASAKI, T. Metabolism and physiology of calcium and magnesium. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. (Ed.) **Science of the rice plant**. Tokyo: Physiology, Food and Agricultural Policy Research Center, 1995. v.2, p.391-395.
- KROPFF, M.J.; MATTEWS, R.B.; van LAAR, H.H.; ten BERGE, H.F.M. The rice model Oryza1 and its testing. In: MATTHEWS, R.B.; KROPFF, M.J.; BACHELET, D.; van LAAR, H.H. (Ed.) **Modeling the impact of climate change on rice production in Asia**. Manila: International Rice Research Institute, 1995. p.27-50.
- LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O.; TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.1-12, 1996.
- McCLURE, J.W.; HARVEY, C. Use of radiophosphorus in measuring root growth of sorghums. **Agronomy Journal**, v.54, p.457-459, 1962.
- MALAVOLTA, E. **Elementos da nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres. 1980. 251p.

- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.
- MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its application**. Paris: École National Supérieure de Mines de Paris, 1971. (Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 5).
- MEDEIROS, R.D. de. Efeito do manejo de água e de sistemas de controle de plantas daninhas em arroz (*Oryza sativa* L.) irrigado. Piracicaba, 1995. 80p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- MUNAKATA, K. Simulation of population photosynthesis and dry matter production. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. (Ed.) **Science of the rice plant**. Tokyo, Physiology, Food and Agricultural Policy Research Center, 1995. v.2, p.671-684.
- MURAYAMA, N. Development and senescence. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. (Ed.) **Science of the rice plant**. Tokyo, Physiology, Food and Agricultural Policy Research Center, 1995. v.2, p.119-132.
- NIKOLAEVA, S.A.; TSVETNOVA, O.B.; SHCHEGLOV, A.I. Phosphate regime features of rice field soils in lower kubon river delta. **Soil Chemistry**, v.41, n.4, p.7-13, 1986.
- OHNO, Y.; MARUR, C.J. Physiological analysis of factors limiting growth and yield of upland rice. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Annual report of ecophysiological study of rice**. Londrina, 1977. 17p.
- PENNING de VRIES, F.W.T. Some opportunities for using crop models in rice. Proceeding of the international workshop on the impact of weather parameters on growth and yield of rice, International Rice Research Institute, 1987, p.291-300.
- PERDOMO, M.A.; GONZALEZ, J.; GALVIS, C. de; GARCIA, E.; ARREGOCÉS, O. Los macronutrientes en la nutrición de la planta de arroz. In: TASCON, J.E.; GARCIA, D.E. (Ed.) **Arroz: investigación y producción**. Cali: CIAT, 1985. p.103-132.

- PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C. **Análise quantitativa do crescimento de Comunidade vegetal**. Campinas: Agrônomo, 1987. 33p. (Boletim Técnico, 114).
- PINHEIRO, B.S. Características morfofisiológicas da planta relacionada à produtividade. In: VIEIRA, N.R.A.; SANTOS, A.B. dos; SANT'ANA, E.P. (Ed.) **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. cap.5, p.173-195.
- PINHEIRO, B. S.; GUIMARÃES, E.P. Índice de área foliar e produtividade do arroz de sequeiro. 1. Níveis limitantes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.25, n.6, p.863-872, 1990.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. Métodos de análises de solo para fins de fertilidade. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 31p. (Boletim Técnico, 81).
- SASAKI, Y.; HIRATA, H. Absorption and metabolism of phosphate. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. (Ed.) **Science of the rice plant**. Tokyo: Physiology, Food and Agricultural Policy Research Center, 1995. v.2, p.368-383.
- SILVEIRA FILHO, A. A integração de métodos cultural, manual e químico no controle de plantas daninhas e na produção de arroz (*Oryza sativa* L.), irrigado por submersão e em várzea úmida. Piracicaba, 1992. 155p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- SOUZA, A. de; COSTA, J.M.N. da. Temperatura base para cálculo de graus-dia para cultivares de arroz no Triângulo Mineiro. **Lavoura Arrozeira**, v.45, n.400, p.24-28, 1992.
- SUZUKI, A. Metabolism and physiology of sulfur. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. (Ed.) **Science of the rice plant**. Tokyo: Physiology, Food and Agricultural Policy Research Center, 1995. v.2, p.395-401.
- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

- WATSON, D.J. The physiological basis of a variation in yield. **Advances in Agronomy**, v.4, p.101-144, 1952.
- WHISLER, F.D.; ACOCK, B.; BAKER, D.N.; FYE, R.E.; HODGES, H.F.; LAMBERT, J.R.; LEMMON, H.E.; McKINION, J.M.; REDDY, V.R. Crop simulation models in agronomic systems. **Advances in Agronomy**, v.40, p.141-208, 1986.
- YIN, X. Quantifying the effects of temperature and photoperiod on phenological development to flowering in rice. Wageningen, 1966. 173p. Thesis (Ph.D.) - Wageningen Agricultural University.
- YOSHIDA, S. **Fundamental of rice crop science**. Los Baños: International Rice Research Institute, 1981. 269p.

APÊNDICES

APÊNDICE 1

Tabela 32. Variação temporal do índice de área foliar (valores observados).

Estádio	Data	GD	Dr	DAS	DAE	IAF (m ² .m ⁻²)			
						I	II	III	Média
Plântula	07/10/1999	14,60	0,01	9	1	0,01	0,015	0,02	0,015
Quatro folhas	20/10/1999	204,20	0,11	22	14	0,015	0,02	0,025	0,021
Início do perfilhamento	27/10/1999	294,35	0,16	29	21	0,045	0,045	0,045	0,046
Perfilhamento pleno	16/11/1999	574,75	0,32	49	41	0,79	0,755	0,965	0,834
Elongação dos entrenós	30/11/1999	791,05	0,44	63	55	2,18	2,255	2,76	2,396
Início de formação da panícula	14/12/1999	1021,15	0,56	77	69	3,99	3,44	4,085	3,840
Início do emborrachamento	28/12/1999	1257,70	0,69	91	83	4,63	4,515	5,17	4,772
Emissão da panícula	07/01/2000	1417,15	0,78	101	93	5,16	6,225	6,201	5,860
Grão pastoso	18/01/2000	1616,40	0,89	112	104	4,72	5,53	5,24	5,081
Ponto de maturidade fisiológica	30/01/2000	1809,95	1,00	124	116	4,17	4,705	4,81	4,562

Tabela 33. Teor de nutrientes (g.kg^{-1}) observado nas diferentes partes da planta.

Estádio	N	P	K	Ca	Mg	S
Planta						
V ₀	22,77	1,97	21,83	3,65	2,94	4,34
V ₁	24,23	2,71	26,10	3,96	3,17	5,24
V ₂	27,63	2,57	25,56	3,89	2,80	5,60
V ₃	23,37	2,01	27,04	3,84	2,17	4,04
V ₄	17,99	1,28	15,02	3,67	1,65	2,66
R ₅	12,57	2,02	17,66	2,07	1,97	3,45
R ₆	21,32	1,68	11,17	1,18	1,36	3,15
R ₇	14,85	2,17	17,34	2,08	1,82	3,43
M ₉	10,39	2,08	13,12	1,79	1,83	2,29
M ₁₀	10,30	1,85	9,03	1,99	1,67	2,02
Raiz						
V ₀	12,00	1,80	21,60	2,90	3,40	6,60
V ₁	14,60	2,60	27,20	2,80	4,00	7,50
V ₂	16,10	1,90	23,60	2,50	2,80	7,40
V ₃	18,30	1,70	26,50	2,30	2,40	7,80
V ₄	10,20	1,20	7,00	2,20	1,80	5,90
R ₅	4,30	1,00	3,40	1,20	1,50	10,30
R ₆	9,70	1,60	3,40	1,90	1,20	12,20
R ₇	6,90	1,30	6,30	2,20	1,40	11,30
M ₉	5,20	1,20	3,80	1,20	1,20	9,20
M ₁₀	5,50	1,10	3,00	1,70	1,30	9,30
Folha e colmo						
V ₀	30,60	2,10	22,00	4,20	2,60	2,70
V ₁	32,10	2,80	25,20	4,90	2,50	3,40
V ₂	38,50	3,20	27,40	5,20	2,80	3,90
V ₃	24,90	2,10	27,20	4,30	2,10	2,90
V ₄	20,30	1,30	17,40	4,10	1,60	1,70
R ₅	14,80	2,30	21,50	2,30	2,10	1,60
R ₆	24,20	1,70	13,10	1,00	1,40	0,90
R ₇	16,40	2,30	19,80	2,10	1,90	1,70
M ₉	11,50	2,30	16,70	2,30	2,10	1,00
M ₁₀	11,60	1,70	14,70	3,70	2,10	0,90
Panicula						
R ₅	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
R ₆	50,10	8,40	25,60	0,10	3,10	2,80
F bandeira	31,40	6,20	23,10	0,10	2,90	2,60
R ₇	23,60	4,60	18,00	0,30	2,50	1,90
M ₈	13,20	2,50	10,50	0,20	1,40	1,40
	15,50	2,90	12,90	0,20	1,80	0,90
M ₈₋₉	10,90	2,00	7,30	0,20	1,30	0,80
M ₉	9,20	1,20	4,00	2,00	0,80	0,20
	10,40	2,20	4,50	0,10	1,20	0,80
M ₁₀	10,50	2,30	4,60	0,10	1,30	0,70
Parte aérea						
V ₀	30,60	2,10	22,00	4,20	2,60	2,70
V ₁	32,10	2,80	25,20	4,90	2,50	3,40
V ₂	38,50	3,20	27,40	5,20	2,80	3,90
V ₃	24,90	2,10	27,20	4,30	2,10	2,90
V ₄	20,30	1,30	17,40	4,10	1,60	1,70
R ₅	14,80	2,30	21,50	2,30	2,10	1,60
R ₆	24,20	1,70	13,10	1,00	1,40	0,90
R ₇	16,59	2,36	19,75	2,05	1,92	1,71
M ₉	11,39	2,24	14,91	1,90	1,95	0,96
M ₁₀	11,09	1,98	10,03	2,04	1,73	0,81

Tabela 34. Resumo estatístico para os teores de nutrientes observados nas diferentes partes da planta.

Compartimento	M	n	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	QI	QS	DP	EP	CV
Total	N	10	18,54	19,65	10,30	27,63	10,39	23,07	6,22	1,97	33,53
	P	10	2,03	2,02	1,28	2,71	1,68	2,12	0,41	0,13	20,07
	K	10	18,39	17,50	9,03	27,04	11,17	23,69	6,48	2,05	35,24
	Ca	10	2,81	2,87	1,18	3,96	1,79	3,75	1,08	0,34	38,33
	Mg	10	2,14	1,90	1,36	3,17	1,65	2,48	0,62	0,20	28,92
	S	10	3,62	3,44	2,02	5,60	2,29	4,19	1,19	0,38	32,94
Raiz	N	10	10,28	9,95	4,30	18,30	5,20	13,30	4,90	1,55	47,66
	P	10	1,54	1,45	1,00	2,60	1,10	1,75	0,49	0,15	31,55
	K	10	12,58	6,65	3,00	27,20	3,40	22,60	10,64	3,36	84,55
	Ca	10	2,09	2,20	1,20	2,90	1,20	2,40	0,59	0,19	28,39
	Mg	10	2,10	1,65	1,20	4,00	1,20	2,60	1,00	0,32	47,83
	S	10	8,75	8,50	5,90	12,20	6,60	9,80	2,06	0,65	23,59
Folha e colmo	N	10	22,49	22,25	11,50	38,50	11,60	27,75	9,21	2,91	40,96
	P	10	2,18	2,20	1,30	3,20	1,70	2,30	0,55	0,17	25,20
	K	10	20,50	20,65	13,10	27,40	14,70	23,60	5,06	1,60	24,70
	Ca	10	3,41	3,90	1,00	5,20	2,10	4,25	1,39	0,44	40,76
	Mg	10	2,12	2,10	1,40	2,80	1,60	2,30	0,43	0,14	20,36
	S	10	2,07	1,70	0,90	3,90	0,90	2,80	1,08	0,34	52,38
Panícula	N	10	17,48	12,05	0,00	50,10	9,20	19,55	14,27	4,51	81,66
	P	10	3,23	2,40	0,00	8,40	1,20	3,75	2,50	0,79	77,27
	K	10	11,05	8,90	0,00	25,60	4,00	15,45	8,69	2,75	78,62
	Ca	10	0,33	0,15	0,00	2,00	0,10	0,20	0,59	0,19	179,59
	Ca	9(dsd)	0,14	0,10	0,00	0,30	0,10	0,20	0,09	0,03	61,06
	Mg	10	1,63	1,35	0,00	3,10	0,80	2,15	0,96	0,30	59,13
Parte aérea	S	10	1,21	0,85	0,00	2,80	0,20	1,65	0,95	0,30	78,64
	N	10	22,45	22,25	11,09	38,50	11,39	27,75	9,28	2,93	41,34
	P	10	2,21	2,17	1,30	3,20	1,70	2,33	0,53	0,17	24,00
	K	10	19,85	20,63	10,03	27,40	13,10	23,60	5,96	1,88	30,01
	Ca	10	3,20	3,20	1,00	5,20	1,90	4,25	1,49	0,47	46,51
	Mg	10	2,07	2,02	1,40	2,80	1,60	2,30	0,45	0,14	21,76
	S	10	2,06	1,70	0,81	3,90	0,90	2,80	1,10	0,35	53,45

M = nutriente; QI = quartil inferior; QS = quartil superior; DP = Desvio padrão; EP = Erro padrão; CV = Coeficiente de variação (%); dsd = dados sem os valores discrepantes.

APÊNDICE 2

Figura 27 - Variação temporal dos teores de macronutrientes na planta.

Figura 28 - Variação temporal dos teores de macronutrientes na raiz.

Figura 29 - Variação temporal dos teores de macronutrientes nas folhas e colmos.

Figura 30 - Variação temporal dos teores de macronutrientes na panícula.

Figura 31 - Variação temporal dos teores de macronutrientes na parte aérea da planta.