

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

FORMAÇÃO E PARTIÇÃO DA MATÉRIA SECA DE *Avena sativa* L. E USO DE
SENSORES PROXIMAIS NA FENOTIPAGEM

Eduardo José Haverroth
Engenheiro agrônomo/UDESC

Dissertação apresentada com um dos requisitos
à obtenção do Grau de Mestre em Fitotecnia
Área de concentração sistemas de produção vegetal

Porto Alegre (RS), Brasil
Fevereiro de 2019

CIP - Catalogação na Publicação

Haverroth, Eduardo José
FORMAÇÃO E PARTIÇÃO DA MATÉRIA SECA DE Avena sativa
L. E USO DE SENSORES PROXIMAIS NA FENOTIPAGEM /
Eduardo José Haverroth. -- 2019.
160 f.
Orientadora: Carla Andrea Delatorre.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, BR-RS,
2019.

1. Aveia. 2. Partição de massa seca. 3. Sensores
ópticos. 4. Nitrogênio. 5. Potencial produtivo. I.
Delatorre, Carla Andrea, orient. II. Título.

EDUARDO JOSÉ HAVERROTH
Engenheiro Agrônomo - UDESC

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM FITOTECNIA

Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 26.02.2019
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 22.04.2020
Por

CARLA ANDREA DELATORRE
Orientadora - PPG Fitotecnia
UFRGS

CHRISTIAN BREDEMEIER
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia

MARCELO TEIXEIRA PACHECO
PPG Fitotecnia/UFRGS

ANDRÉ LUIS VIAN
Faculdade de Agronomia/UFRGS

ALENCAR JUNIOR ZANON
UFSM/RS

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade de
Agronomia

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por sempre me incentivarem a estudar e procurar entender como o mundo funciona. Por compreenderem minha ausência desde minha adolescência, quando fui morar em outra cidade para cursar o ensino médio concomitante ao curso técnico em agropecuária. Ao meu pai por me apresentar a importância da agricultura e demonstrar o impacto que a dedicação profissional pode ter na vida de outras pessoas.

Agradeço a todos os professores que participaram da minha jornada acadêmica, em especial a professora Carla Andrea Delatorre. Resumi-la como orientadora seria certamente um equívoco. Agradeço-a pela orientação, confiança, amizade, oportunidades, incentivos e por não medir esforços em esclarecer dúvidas e auxiliar nas diversas tomadas de decisão que ocorreram ao longo do curso de mestrado. Agradeço também ao professor Marcelo Teixeira Pacheco pelas diversas caronas até a estação experimental e por demonstrar que trabalhar com amor, mesmo em atividades repetitivas e árduas, sempre é recompensador.

Aos meus colegas de grupo de pesquisa (*my great team*), Vanessa de Freitas Duarte, Filipe Kalikoski Coelho, Mariana Barbosa Pereira, Fernanda Arns e Paula Ribeiro da Rocha de Castro e Souza pela amizade, apoio nas diversas atividades desenvolvidas, incentivo e pelos momentos de descontração.

Ao colega e amigo Fabrício André Musa pelo companheirismo durante o desenvolvimento do ensaio experimental realizado em parceria.

Aos amigos que fiz durante esta caminhada, Alexandre, Ana, André, Carlos, Carol, Cátia, Christian, Itacir, Jéssica, Marília, Mateus, Tiago e Walker e aos demais colegas do Departamento de Plantas de Lavoura pelo convívio diário, pelas conversas que agregaram na vida profissional e pessoal e, principalmente, por me proporcionarem diversos momentos lúdicos.

A todas as demais pessoas que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento de minha vida acadêmica.

Ao CNPq pela concessão de bolsa durante o curso de mestrado, possibilitando a dedicação integral às atividades acadêmicas.

FORMAÇÃO E PARTIÇÃO DA MATÉRIA SECA DE *Avena sativa* L. E USO DE SENSORES PROXIMAIS NA FENOTIPAGEM¹

Autor: Eduardo José Haverroth
Orientadora: Carla Andrea Delatorre

RESUMO

Os atuais genótipos do programa de melhoramento de aveia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul apresentam grandes diferenças morfológicas em relação aos genótipos do início do programa. Com isso, surgiram incertezas a respeito da formação do rendimento de grãos. A maneira como ocorre o acúmulo e a partição da massa seca da parte aérea está relacionada como rendimento de grãos. Índices vegetativos, obtidos por sensores ópticos, são interessantes ferramentas utilizadas no monitoramento da massa seca do dossel de plantas. Esse trabalho foi realizado com o objetivo de elucidar o comportamento de produção de massa seca da parte aérea, fornecer informações a respeito da alocação de massa e nitrogênio para o grão e verificar a possibilidade do uso de sensores ópticos para estimativa de massa seca da parte aérea e rendimento de grãos. Para atender aos objetivos, foram conduzidos seis ensaios experimentais nas safras 2017 e 2018, no município de Eldorado do Sul, RS. Foi realizado um experimento onde dose de adubação nitrogenada e genótipo foram fatores experimentais. Nos demais ensaios, apenas genótipo foi fator experimental. Foram mensurados parâmetros de massa seca, componentes do rendimento de grãos e índices vegetativos. Quanto maior a massa seca vegetativa acumulada no florescimento, maior é o rendimento de grãos. Mas isso é dependente de genótipo, por conta das diferenças nas partições de massa seca vegetativa em reprodutiva. Genótipos com menores número de grãos, mas alta massa seca vegetativa, apresentam maior massa seca do grão. A senescência tardia e vagarosa está relacionada com maiores rendimentos de grãos, exceto para URS F Flete. O parâmetro taxa de acúmulo de massa seca apresenta maior importância na definição da massa final do grão do que a duração do acúmulo, havendo baixa variabilidade para o segundo caráter entre os genótipos de aveia branca. A diferença existente entre os genótipos para os parâmetros de massa seca, nitrogênio e fósforo acumulado são explicados pela taxa de acúmulo. A dose de nitrogênio não afeta a massa final do grão, mas altera o comportamento de acúmulo de massa. Os índices NDVI e IOP foram capazes de perceber o aumento da dose nitrogenada, mas o índice SPAD não. Quanto maior o valor de NDVI e IOP maior é a massa seca da parte aérea e o rendimento de grãos. No entanto, os índices não se mostraram consistentes na predição de rendimento de grãos e massa seca da parte aérea. Possivelmente, o uso de modelos mais específicos, que incluam informações de mais de um ano possam melhorar as predições.

¹ Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil (160f.) Fevereiro, 2019.

FORMATION AND PARTITION OF DRY MASS *Avena sativa* L. AND USE OF PROXIMAL SENSORS IN PHENOTYPING²

Author: Eduardo José Haverroth

Adviser: Carla Andrea Delatorre

ABSTRACT

The current oat genotypes of the Federal University of Rio Grande do Sul breeding have large morphological differences in relation to the genotypes at the beginning of the program. As a result, uncertainties regarding grain yield formation emerged. How shoot dry mass is accumulated and partitioned is related to grain yield. Vegetative indexes, obtained by optical sensors, are interesting tools used to monitor the shoot dry mass. The aim of this work was to elucidate the shoot dry mass production behavior, provide information on the allocation of mass and nitrogen to the grain and verify the possibility of the use of optical sensors to estimate shoot dry mass and grain yield. To meet the objectives, six experiments were conducted in the 2017 and 2018 crops, in Eldorado do Sul, RS. An experiment had nitrogen fertilization dose and genotype as experimental factors. In the other experiments, only genotype was an experimental factor. It was measured parameters like dry mass, grain yield components and vegetative indexes. The greater the vegetative dry mass accumulated at flowering stage, the greater the grain yield. But this is dependent on genotype, due to the differences in the vegetative to reproductive dry mass partitions. Genotypes with a lower number of grains but high vegetative dry mass have a higher dry mass of the grain. Late and slow senescence is related to higher grain yields, except for URS F Flete. The dry matter accumulation rate is more important on the definition of the final grain mass than its duration, with low variability for the second parameter among the genotypes. The difference among the genotypes for the parameters of dry mass, nitrogen, and phosphorus accumulated are explained by the rate of accumulation. The nitrogen dose does not affect the final grain mass but alters the mass accumulation behavior. The NDVI and IOP indices were able to perceive the nitrogen dose increment but the SPAD index did not. The higher the NDVI and IOP, the higher the shoot dry mass and the grain yield. However, the vegetative indexes were not consistent in predicting grain yield and shoot dry mass. The use of more specific models, which include information longer than one year, may possibly improve predictions.

² Master Dissertation in Plant Science, Faculdade de agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil (160p.) February, 2019.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 A aveia branca	4
2.2 Um breve panorama econômico da aveia branca.....	5
2.3 Componentes do rendimento de grãos	8
2.4 Dinâmica do acúmulo de massa seca nos grãos de aveia....	12
2.5 Massa seca acumulada e rendimento de grãos.....	13
2.6 Nitrogênio e o rendimento de grãos	15
2.7 Comportamento espectral da vegetação.....	18
2.8 Aplicações do comportamento espectral na agricultura.....	23
2.9 Referências bibliográficas	28
3 CAPÍTULO 1 - Acúmulo de massa seca no grão em genótipos de aveia-branca	34
3.1 Introdução	35
3.2 Material e métodos.....	37
3.2.1 Descrição do local de desenvolvimento do experimento	37
3.2.2 Caracterização dos experimentos.....	38
3.2.3 Análise estatística	41
3.3 Resultados	43
3.4 Discussão.....	60
3.5 Conclusões	65
3.6 Referências bibliográficas	66
4 CAPÍTULO 2 - Relação de índices de vegetação obtidos por sensores ópticos com parâmetros morfofisiológicos de Avena sativa	69
4.1 Introdução	70
4.1 Material e métodos.....	73
4.1.1 Local de desenvolvimento dos experimentos.....	73
4.1.2 Caracterização dos experimentos.....	74

	Página
4.1.3 Estimativa de índices vegetativos	78
4.1.4 Análise estatística	79
4.2 Resultados	80
4.1 Discussão.....	94
4.2 Conclusões	101
4.3 Referências bibliográficas	101
5 CAPÍTULO 3 - Efeito da adubação nitrogenada no crescimento, rendimento de grãos e índice de vegetação por diferença normalizada de cinco genótipos de aveia branca	105
5.1 Introdução	106
5.2 Material e métodos.....	108
5.2.1 Local de desenvolvimento dos experimentos.....	108
5.2.2 Caracterização do experimento	109
5.1 Resultados	112
5.1 Discussão.....	131
5.2 Conclusões	135
5.3 Referências bibliográficas	136
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	138
7 APÊNDICES	141

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
1. Exemplos de potenciais aplicações de sensores ópticos na fenotipagem de plantas.....	25
CAPÍTULO 1	
1. Características e genealogia dos genótipos utilizados nos experimentos.	39
2. Quantidade total e parcial de nitrogênio aplicada (kg de N ha ⁻¹) na adubação de base e nos estádios fenológicos de três e seis folhas completamente expandidas, em cada safra e tratamento.	40
3. Equações matemáticas dos parâmetros estimados a partir da curva de acúmulo de massa seca no grão.	43
4. Parâmetros de caracterização do comportamento do acúmulo de massa seca no grão de sete genótipos de aveia. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.....	44
5. Médias dos parâmetros rendimento de grãos (RDM), número de panículas em 0,1m ² (NPA), número de grãos por panícula (NGP) e massa de mil grãos (MMG) de sete genótipos de aveia-branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.....	53
6. Parâmetros de caracterização do comportamento do acúmulo de nitrogênio e fósforo no grão primário do terço superior, em dois genótipos de aveia com massa individual do grão contrastantes. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.....	55
7. Massa seca acumulada no grão, dias após o florescimento, teores de nitrogênio e fósforo no grão e quantidade acumulada no grão de nitrogênio e fósforo no momento de acúmulo de 5% e 95% da massa seca do grão, referentes aos genótipos URS Altiva e URS F Flete. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.....	56
8. Parâmetros de caracterização do comportamento do acúmulo de massa seca nos grãos do terço médio da panícula do genótipo URS Altiva em diferentes doses de nitrogênio. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.....	59
9. Médias dos parâmetros rendimento de grãos (RDM), estatura de plantas (EST), número de grãos por panícula (NGP) e massa de mil grãos (MMG) do genótipo URS Altiva em diferentes doses de nitrogênio. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.	59

CAPÍTULO 2

1. Análise de solo da área experimental da safra 2018. UFRGS, Faculdade de Agronomia, departamento de solos, laboratório de análises, 2018.....	74
2. Quantidade total de nitrogênio aplicada no tratamento e quantidades parciais de nitrogênio aplicadas (kg de N ha ⁻¹), conforme o momento de aplicação.....	77
3. Análise de variância dos parâmetros rendimento de grãos (RDM), massa seca em seis folhas completamente expandidas (MSF), massa seca em alongamento de entrenós (MAE), massa seca no florescimento (MFL) e massa seca na massa mole do grão (MMM) do experimento com variação de dose de nitrogênio. EEA/UFRS, Eldorado do Sul, RS. 2018.....	81
4. Correlações entre rendimento de grãos e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento fenológico de diferentes genótipos de aveia. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.....	82
5. Diferenças entre média do rendimento de grãos observado e o rendimento previsto por modelo matemático através do índice de vegetação por diferença normalizada do estádio fenológico de alongamento de entrenós.	85
6. Correlações entre massa seca da parte aérea total e índice de vegetação por diferença normalizada em diferentes estádios de desenvolvimento fenológico de diferentes genótipos de aveia. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.....	86
7. Diferenças entre média da massa seca total da parte aérea observada e prevista por modelo matemático através do índice de vegetação por diferença normalizada, nos estádios fenológicos de alongamento de entrenós (AE) e florescimento (FL), nas safras 2017 e 2018.....	88
8. Correlações entre rendimento de grãos e índice de ocupação de plantas nos estádios fenológicos seis folhas completamente expandidas e alongamento de entrenós, de cinco genótipos de aveia branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.....	90
9. Diferenças entre média do rendimento de grãos observado e rendimento de grãos previsto por modelo matemático através do índice de ocupação de plantas (IOP), no estádio fenológico de alongamento de entrenós.	92
10. Correlações entre rendimento de grãos e índice SPAD nos estádios fenológicos seis folhas completamente expandidas, alongamento de entrenós e florescimento, de cinco genótipos de aveia branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.....	92

CAPÍTULO 3

1. Análise de solo da área experimental da safra 2018. UFRGS, Faculdade de Agronomia, departamento de solos, laboratório de análises, 2018.....	108
2. Quantidade total de nitrogênio aplicada no tratamento e quantidades parciais de nitrogênio aplicadas (kg de N ha ⁻¹), conforme o momento de aplicação.....	109
3. Análise de variância do experimento com variação de dose de nitrogênio. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.	114
4. Eficiência agrônômica do uso do nitrogênio (kg kg ⁻¹) de cinco genótipos de aveia branca, em três doses de adubação nitrogenada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.....	116
5. Médias e intervalos de confiança (95%) da massa seca do tecido vegetativo (kg ha ⁻¹) nos estádios fenológicos de seis folhas completamente expandidas (MVSF), alongamento de entrenós (MVAE), florescimento (MVFL), massa mole do grão (MVMM) e colheita (MVCO) de cinco genótipos de aveia-branca, sob quatro doses de adubação nitrogenada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.....	125
6. Médias e intervalos de confiança (95%) da massa seca do tecido reprodutivo (kg ha ⁻¹) nos estádios fenológicos de florescimento (MRFL), massa mole do grão (MRMM) e colheita (MRCO) e massa seca total nos estádios fenológicos de florescimento (MTFL), massa mole do grão (MTMM) e colheita (MTCO) de cinco genótipos de aveia-branca, sob quatro doses de adubação nitrogenada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.....	126
7. Médias e intervalos de confiança (95%) dos parâmetros rendimento de grãos (RDM), estatura de plantas (EST), número de grãos por panícula (NGP), massa de mil grãos (MMG) e relação entre massa seca reprodutiva e massa seca total na colheita (RRT), de cinco genótipos de aveia-branca, sob quatro doses de adubação nitrogenada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.....	127
8. Médias e intervalos de confiança (95%) dos parâmetros teor de nitrogênio no grão (TNG), teor de fósforo no grão (TPG), nitrogênio acumulado no grão (NAG), fósforo acumulado no grão (PAG), número de folhas verdes no estádio de florescimento (FVFL) e número de folhas verdes no estádio de massa mole do grão (FVMM) de cinco genótipos de aveia-branca, sob quatro doses de adubação nitrogenada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.....	128
9. Médias e intervalos de confiança (95%) do teor de nitrogênio no tecido vegetativo (%) nos estádios fenológicos de seis folhas completamente expandidas (TNSF), alongamento de entrenós (TNAE), florescimento (TNFL), massa mole do grão (TNMM) e colheita (TNCO) de cinco genótipos de aveia-branca, sob quatro doses de adubação nitrogenada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.....	129

10. Médias e intervalos de confiança (95%) da quantidade de nitrogênio acumulada no tecido vegetativo (kg ha^{-1}) nos estádios fenológicos de seis folhas completamente expandidas (NASF), alongamento de entrenós (NAAE), florescimento (NAFL), massa mole do grão (NAMM) e colheita (NACO) de cinco genótipos de aveia-branca, sob quatro doses de adubação nitrogenada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018. 130

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
1. Série histórica (1976-2017) da área cultivada, produção e rendimento de grãos de aveia no mundo..	6
2. Série histórica (1976-2019) da área cultivada, produção e rendimento de grãos de aveia no Brasil.....	7
3. Série histórica (1977-2018) da área cultivada, produção e rendimento de grãos de trigo no Brasil..	7
4. Curva típica de reflectância da vegetação verde. Fonte: Novo (2011).	19
CAPÍTULO 1	
1. Massa seca do grão em relação a duração efetiva do acúmulo de massa seca no grão, de sete genótipos de diferentes posições na panícula e tipos de grãos. S1: grão primário do terço superior; S2: grão secundário do terço superior; M1: grão primário do terço médio; M2: grão secundário do terço médio; I1: grão primário do terço inferior; I2: grão secundário do terço inferior.	47
2. Massa seca do grão em relação a taxa média de acúmulo de massa seca no grão, de sete genótipos de diferentes posições na panícula e tipos de grãos. S1: grão primário do terço superior; S2: grão secundário do terço superior; M1: grão primário do terço médio; M2: grão secundário do terço médio; I1: grão primário do terço inferior; I2: grão secundário do terço inferior.	48
3. Comportamento do acúmulo de massa seca nos grãos primários (círculo preto) e secundários (círculo branco) do terço superior da panícula de sete genótipos de aveia branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.....	49
4. Comportamento do acúmulo de massa seca nos grãos primários (círculo preto) e secundários (círculo branco) do terço médio da panícula de sete genótipos de aveia branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.....	50
5. Comportamento do acúmulo de massa seca nos grãos primários (círculo preto) e secundários (círculo branco) do terço inferior da panícula de sete genótipos de aveia branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.....	51

6.	Comportamento do acúmulo de nitrogênio nos grãos primários do terço superior da panícula, dos genótipos URS Altiva (círculo preto) e URS F Flete (círculo branco). Barras representam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.	54
7.	Comportamento do acúmulo de fósforo nos grãos primários do terço superior da panícula, dos genótipos URS Altiva (círculo preto) e URS F Flete (círculo branco). Barras representam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.....	54
8.	Dinâmica dos teores de nitrogênio (esquerda) e fósforo (direita) no grão primário do terço superior da panícula, dos genótipos URS Altiva (círculo preto) e URS F Flete (círculo branco). Barras representam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.....	55
9.	Comportamento do acúmulo de massa seca nos grãos primários (círculo preto) e secundários (círculo branco) do terço médio da panícula do genótipo URS Altiva em diferentes doses de nitrogênio. Barras representam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.....	57

CAPÍTULO 2

1.	Processamento de imagens para obtenção do índice de cobertura do solo (IOP), onde em (A) é apresentada a imagem das três linhas centrais da unidade experimental obtida por câmera RGB e (B) a imagem processada identificando os pixels com presença de plantas (verde).	79
2.	Relação entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em quatro estádios fenológicos e o rendimento de grãos, de cinco genótipos de aveia-branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.	84
3.	Relação entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), em quatro estádios fenológicos e a massa seca da parte aérea, de cinco genótipos de aveia-branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.....	87
4.	Relação entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e índice de ocupação de plantas (IOP) de cinco genótipos de aveia em estimativas realizadas ao longo do desenvolvimento da cultura. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.	89
5.	Relação entre o índice de ocupação de plantas (IOP), nos estádios fenológicos de seis folhas completamente expandidas e alongamento de entrenós e rendimento de grãos, de cinco genótipos de aveia-branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.....	91
6.	Gráficos de dispersão entre as variáveis rendimento de grãos (RDM) e índice SPAD de quatro estágios fenológicos (coluna) e cinco genótipos de aveia branca (linha). Os gráficos com denominação geral apresentam a distribuição agrupada dos cinco genótipos. O coeficiente de correlação linear é representado pela variável r	93

CAPÍTULO 3

1. Rendimento de grãos de cinco genótipos de aveia-branca em resposta a crescentes doses de adubação nitrogenada. Barras representam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018..... 115
2. Perfil temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – triângulos brancos), da massa seca do tecido vegetativo (círculos pretos) e da massa seca reprodutiva (círculos brancos) do genótipo URS Taura em diferentes doses de adubação nitrogenada. Barras indicam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018..... 117
3. Perfil temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – triângulos brancos), da massa seca do tecido vegetativo (círculos pretos) e da massa seca reprodutiva (círculos brancos) do genótipo URS Altiva em diferentes doses de adubação nitrogenada. Barras indicam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018..... 118
4. Perfil temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – triângulos brancos), da massa seca do tecido vegetativo (círculos pretos) e da massa seca reprodutiva (círculos brancos) do genótipo URS Corona em diferentes doses de adubação nitrogenada. Barras indicam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018..... 119
5. Perfil temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – triângulos brancos), da massa seca do tecido vegetativo (círculos pretos) e da massa seca reprodutiva (círculos brancos) do genótipo URS 21 em diferentes doses de adubação nitrogenada. Barras indicam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018..... 120
6. Perfil temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – triângulos brancos), da massa seca do tecido vegetativo (círculos pretos) e da massa seca reprodutiva (círculos brancos) do genótipo URS F Flete em diferentes doses de adubação nitrogenada. Barras indicam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018..... 121

1 INTRODUÇÃO

Os genótipos de aveia branca do Programa de Melhoramento Genético de Aveia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul apresentam diferenças marcantes dos genótipos iniciais. O programa, tinha em seu princípio o objetivo de transformar genótipos de aveia branca produtores de foragem, oriundos do germoplasma da Universidade de Wisconsin, em plantas produtoras de grãos adaptadas as condições ambientais do Brasil.

Os genótipos do início do programa apresentavam ciclo longo, estatura de plantas elevada, baixa adaptabilidade ao ambiente, reduzido rendimento e baixa qualidade de grãos. Já os atuais possuem menor porte, favorecendo à resistência a acamamento. O rendimento de grãos foi incrementado, bem como, a qualidade dos grãos produzidos. O ciclo da cultura foi reduzido e selecionou-se materiais adaptados para o ambiente de cultivo, oferecendo aos agricultores uma boa alternativa econômica para o cultivo de inverno no Sul do Brasil, pois permite a semeadura da cultura de verão na época adequada (Federizzi & Pacheco, 2009). No entanto, essa transformação que ocorreu durante a adaptação da aveia branca para produção de grãos gerou uma série de incertezas a respeito do comportamento fisiológico e de manejo destes materiais.

A massa seca acumulada e a arquitetura do genótipo apresentam fortes implicações no rendimento de grãos de cereais de inverno. Como os genótipos reduziram estatura, modificaram massa seca acumulada, tamanho e inclinação foliar, tem-se que essas alterações estejam relacionadas com o maior rendimento

de grãos. Estudar como ocorre o acúmulo e partição de massa seca e de nutrientes e as relações desses com o rendimento de grãos podem fornecer informações importantes para a determinação de um ideótipo da cultura para o programa de melhoramento.

A massa seca do grão é o último dos componentes do rendimento de grãos a ser estabelecido. No entanto, a limitação do acúmulo de massa seca no grão, por ocasião de condições estressantes, pode reduzir drasticamente o rendimento de grãos. O acúmulo de massa seca de grão é o produto da taxa média de acúmulo de massa com sua duração efetiva. Compreender como o acúmulo de massa seca ocorre pode ser importante para reduzir as perdas de rendimento de grãos por condições que podem ser evitadas. Logo determinar qual o principal componente da definição do acúmulo de grãos e como este é afetado em condições que são passíveis de manejo é importante para a determinação de métodos para redução da lacuna de rendimento.

Sensores ópticos têm se mostrado como interessantes ferramentas de avaliação não destrutiva da amostra e de forma rápida (Shakoor *et al.*, 2017). Os sensores ópticos são utilizados para a estimativa de índices vegetativos que estão relacionados com características morfológicas e fisiológicas das plantas e que podem fornecer informações importantes para o acompanhamento e manejo da cultura. Os índices podem, por exemplo, utilizar a reflectância na região vermelho, que é a região do espectro de luz onde atuam os pigmentos fotossintéticos. Logo, a reflectância nessa região pode fornecer informações a respeito do teor de nitrogênio na planta, servindo como informação para diferentes fins. Então, os sensores ópticos, por se tratarem de ferramentas que podem fornecer diversas informações de forma indireta e rápida, o estudo a aplicação destes na cultura da aveia branca podem contribuir para a melhoria do manejo dessa cultura.

A hipótese central do trabalho é que, para a obtenção de altos rendimentos de grãos na cultura da aveia, o genótipo deve aliar a capacidade de produção de massa seca com a força de dreno dos grãos, obtendo panículas com maior número de grãos e de maior massa. Diante disto, objetiva-se elucidar o comportamento do ciclo de produção de massa seca da parte aérea de diferentes genótipos, fornecer informações a respeito da alocação de massa e nitrogênio para o grão e verificar a possibilidade do uso de sensores ópticos para estimativa de massa seca da parte aérea e rendimento de grãos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A aveia branca

A aveia branca (*Avena sativa* L.) e a aveia amarela (*Avena byzantina* K. Koch) são espécies hexaplóides, que foram amplamente cruzadas entre si, de forma que hoje é difícil distingui-las. Por este motivo, a atual Comissão Brasileira de Pesquisa de Aveia considera ambas como *Avena sativa* (Federizzi *et al.*, 2014).

A aveia é uma poácea de clima temperado, que pode ser cultivada em diversas condições climáticas. Possui hábito cespitoso, sistema radicular do tipo fasciculado, colmos cilíndricos e eretos. As folhas são desprovidas de aurícula e apresentam lígula bem desenvolvida, o que a distingue dos demais cereais. A inflorescência é uma panícula piramidal, com grãos primários, secundários e raramente terciário. Os grãos são cariopses indeiscentes, com uma única semente por fruto. O ciclo possui grande variação (de 120 a mais de 200 dias) que depende da época de semeadura (Primavesi; Rodrigues; Godoy, 2000; Welch, 1995).

A aveia branca constitui uma das principais culturas utilizadas no Sul do Brasil para a diversificação da exploração agrícola e seu cultivo tem aumentado constantemente por conta da necessidade de alternativas para rotação de culturas (Federizzi *et al.*, 2014). O cultivo de aveia possui diversas destinações, podendo-se destacar: a) produção de biomassa para alimentação animal (grão, pastagem, feno, silagem); b) utilização do grão para consumo humano; c) matéria prima industrial para produção de cosmético e insumos para a indústria química; d) cobertura de solo e adubação verde com vistas à implantação das culturas de verão

(De Mori *et al.*, 2012); e) matéria-prima para fermentação e produção de etanol a partir dos grãos (Federizzi *et al.*, 2014).

2.2 Um breve panorama econômico da aveia branca

A aveia é um cereal cultivado em todo o mundo. Cerca de 64% da sua produção se concentra na Europa e 25% nas Américas. O rendimento de grãos mundial médio da cultura teve incremento entre 1970 e 2017, entretanto houve grande supressão da área total cultivada (Figura 1). Este decréscimo está sendo parcialmente relacionado à competição com outras culturas, principalmente o trigo (Mahadevan *et al.*, 2016). Apesar deste cenário mundial, no Brasil a situação é inversa. No ano de 1976 foram cultivados 39,8 mil ha de aveia no Brasil, com rendimento médio de 0,9 Mg ha⁻¹. Enquanto a área média cultivada entre as safras de 2014 a 2018 foi de 270 mil ha, com rendimento médio de 2,1 Mg ha⁻¹ (Figura 2).

Segundo a CONAB (2019), na safra 2016 foram cultivados 2,12 milhões de hectares de trigo, 1,83 milhões de hectares na safra 2017 e 2,04 milhões na safra 2018. Com isso, de 2018 em relação a 2016, a produção recuou 22%, chegando a 5,2 milhões de toneladas frente às 6,7 milhões de toneladas da safra 2016. A série histórica de área cultivada, produção e rendimento de grãos da cultura do trigo no Brasil está apresentada na FIGURA 3. Ao contrário do trigo, no mesmo período a aveia elevou a área de cultivo em 10%, chegando aos 376 mil hectares, com uma produção 795 mil toneladas de grãos na safra 2018.

Os acompanhamentos estatísticos são realizados apenas para a área cultivada de aveia branca destinada à produção de grão. No entanto, estima-se que a área destinada para produção de aveia branca para forragem e cobertura do solo seja de aproximadamente 5 milhões de hectares (Federizzi *et al.*, 2014).

A aveia tem tomado importância no sistema de rotação de culturas, especialmente em substituição ao trigo que possui instabilidade na área cultivada (Figura 3). A melhor adaptação das cultivares modernas de aveia, frente ao panorama negativo para a cultura do trigo explica o aumento da produção de aveia no Brasil. Além disso, esse cereal possui importância na sustentabilidade do sistema de plantio direto, por possuir alta capacidade de produção de palhada, com relação carbono:nitrogênio elevada, decompondo-se vagarosamente (Federizzi *et al.*, 2014).

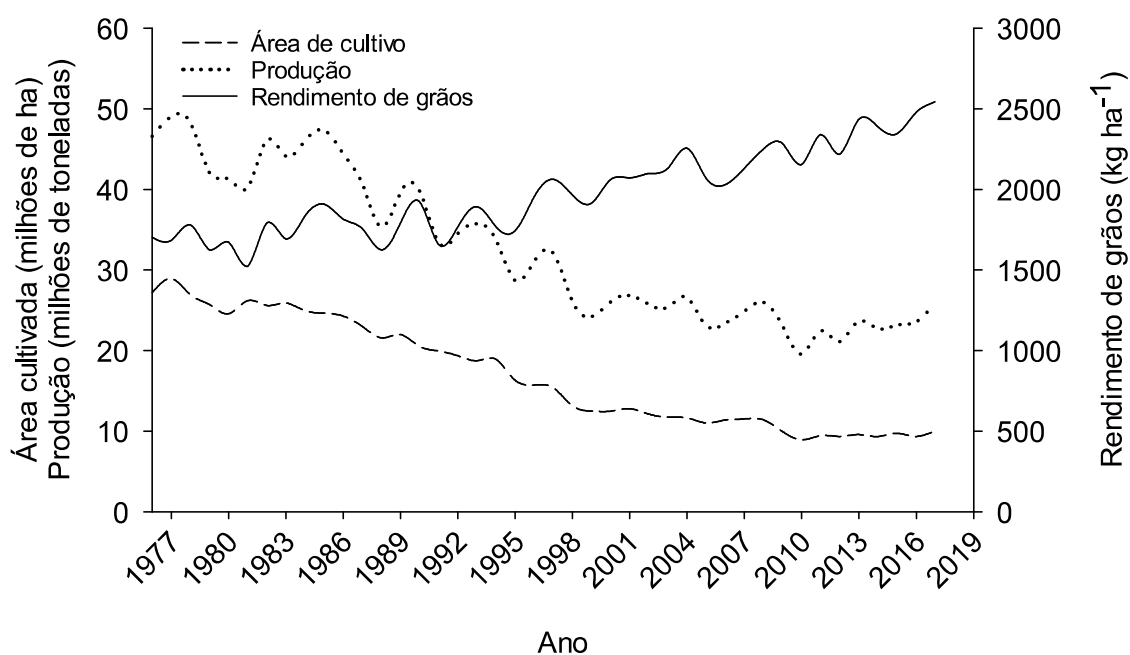


FIGURA 1. Série histórica (1976-2017) da área cultivada, produção e rendimento de grãos de aveia no mundo. Fonte: FAOSTAT, 2017.

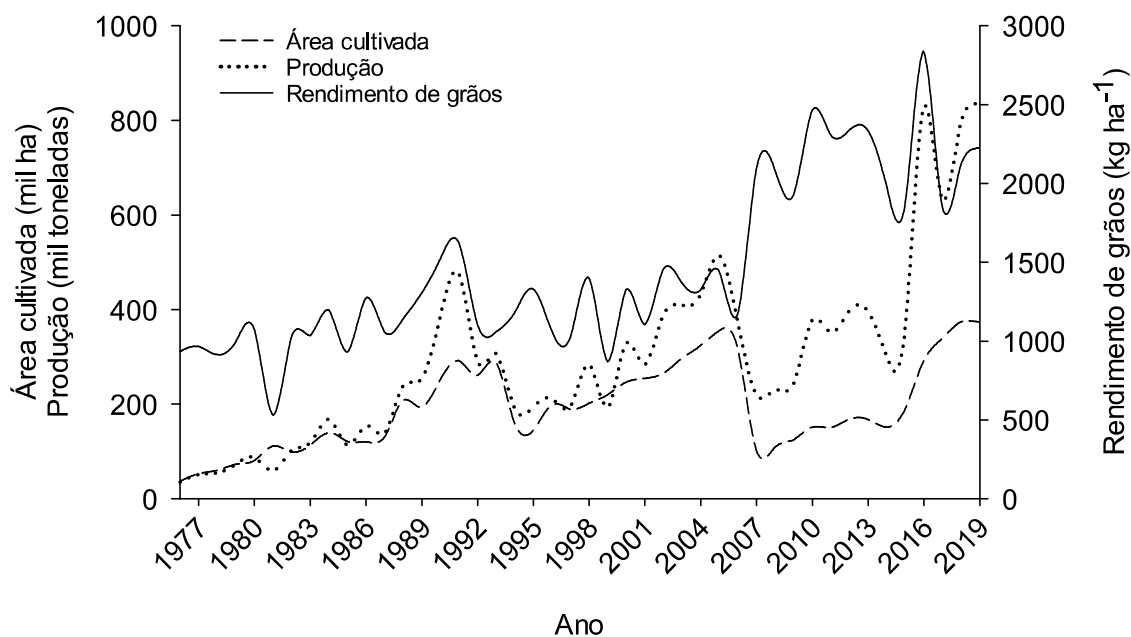


FIGURA 2. Série histórica (1976-2019) da área cultivada, produção e rendimento de grãos de aveia no Brasil. Fonte: CONAB, 2019.

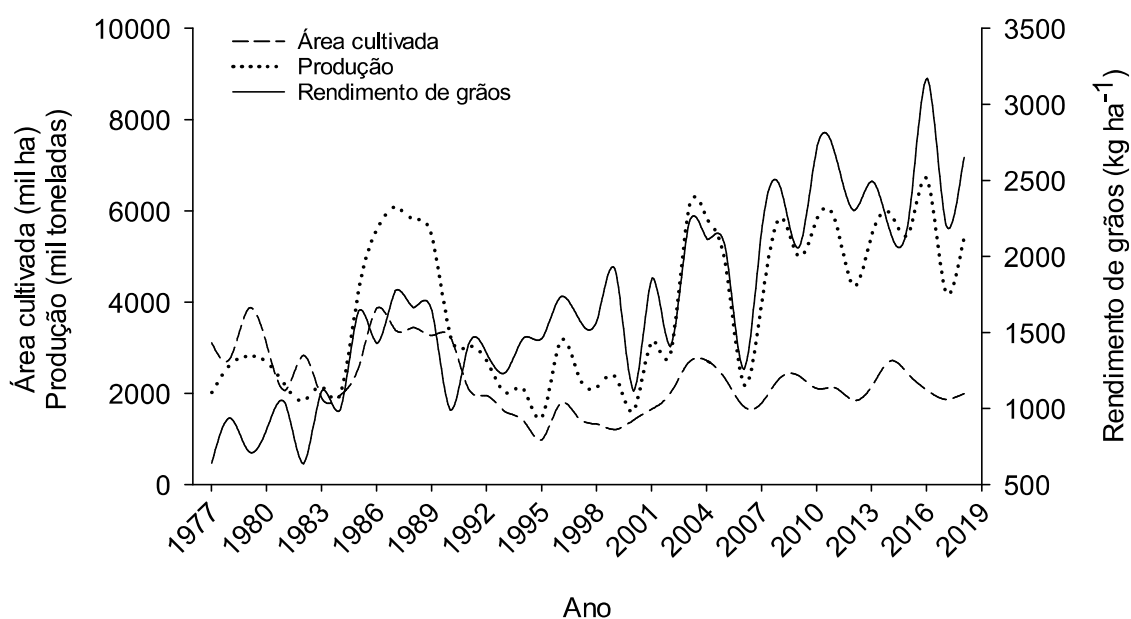


FIGURA 3. Série histórica (1977-2018) da área cultivada, produção e rendimento de grãos de trigo no Brasil. Fonte: CONAB, 2019.

A rotação de culturas com inserção da aveia branca permite um bom aproveitamento das condições físicas do solo. Isto porque esse cereal possui

sistema radicular bem desenvolvido, possibilitando a melhoria na estrutura do solo (Carvalho *et al.*, 1987). A alta capacidade de produção de palhada da cultura, bem como suas características (Federizzi *et al.*, 2014), reduz o impacto da chuva sobre a superfície do solo, reduzindo a capacidade de erosão.

Os benefícios para a saúde poderão ser responsáveis por aumentar a demanda da produção. A aveia recebe considerável atenção por possuir altos teores de fibras dietéticas, fitoquímicos e valor nutricional (Chen *et al.*, 2018; Rasane *et al.*, 2015). O consumo regular pode reduzir os riscos de doenças cardíacas, a reabsorção de colesterol no sangue e as chances de ocorrência de câncer (Rasane *et al.*, 2015). Além de todos os benefícios à saúde proporcionado pelo seu consumo, a aveia é um cereal naturalmente livre de glúten e, por este motivo, está sendo cada vez mais indicada para a alimentação de celíacos (Rasane *et al.*, 2015). Apesar de estimar-se que apenas 1% da população mundial sofre de doença celíaca, a adesão à alimentação livre de glúten como estilo de vida aumenta a cada dia (Chen *et al.*, 2018).

2.3 Componentes do rendimento de grãos

O melhoramento convencional tem se baseado principalmente na seleção para o rendimento de grãos *per se*, juntamente com a resistência a estresses bióticos e abióticos. Essa estratégia pode ser substancialmente aprimorada pela compreensão da base fisiológica e da genética do rendimento (Xie *et al.*, 2016). O rendimento de grãos é uma característica complexa, mas que pode ser dissecada em características relativamente mais simples e que permitem o seu melhor entendimento, como por exemplo os números de panículas por unidade de área e de grãos por panícula e o peso de grãos (Laidig *et al.*, 2017; Peltonen-Sainio *et al.*, 2007). Além disso, podem ser avaliadas características de eficiência energética da

planta, como por exemplo a massa seca produzida e o índice de colheita (Xie *et al.*, 2016).

Os diferentes genótipos podem possuir características contrastantes quanto aos componentes do rendimento, que podem ser interessantes para cruzamentos em programas de melhoramento. Conforme um estudo de dissecação dos componentes de rendimento de centeio, algumas variedades podem apresentar menor massa seca, mas maior índice de colheita e grãos mais pesados, enquanto outras possuem grãos menores, mas menor mortalidade de espiguetas (Keser *et al.*, 2017).

O rendimento de grãos é um processo sequencial onde o número de panículas produzidas por plantas é definido primeiro, seguido pelo número de grãos por inflorescência e pela massa seca de grãos por panícula (Almeida *et al.*, 2003). A densidade de plantas, o perfilhamento e a sincronia de desenvolvimento entre colmo principal e perfilhos têm forte influência sobre os demais componentes (Almeida & Mundstock, 2001).

Entre os componentes numéricos, o aumento do rendimento de grãos em cereais de inverno tem sido associado com o incremento de número de grãos ao invés do peso individual dos grãos (Almeida *et al.*, 2003; Sanchez-Garcia *et al.*, 2012). O número de grãos é determinado, principalmente, pela sobrevivência de flores na pré-antese (Xie *et al.*, 2016). Para trigo, cada espiguetta pode produzir até dez flores, mas menos de cinco (principalmente as mais próximas ao ráquis) produzem grãos e o restante aborta antes da antese (González-Navarro *et al.*, 2015). Portanto, aparentemente a proporção de flores mantidas, ao invés do total de flores, é o principal fator que determina o número final de flores férteis na antese. Esta afirmação pode ser fundamentada pela alta relação existente entre massa seca da inflorescência na antese e sobrevivência de flores (González *et al.*, 2011).

Em aveia, o número de grãos por panícula é definido pela variação no número de espiguetas.

A massa seca da inflorescência pode ser expressa em função da duração do crescimento, da taxa de crescimento da cultura e da partição de massa seca para as inflorescências. Portanto, um aumento destas características durante o período que antecede a antese, pode ser favorável ao desenvolvimento da inflorescência e à sobrevivência de flores (Fischer, 2011). No entanto, a partição da massa seca para os colmos deve diminuir para reduzir a competição por assimilados entre inflorescências e colmos (Kirby, 1988).

Os perfilhos são ramificações laterais que se desenvolvem a partir de gemas axilares dos nós que se localizam abaixo da superfície do solo (Sangoi *et al.*, 2007). Estes são morfologicamente idênticos ao colmo principal e são importantes para os cereais de inverno, pois participam dos componentes do rendimento e suprem fotoassimilados ao colmo principal (Almeida & Mundstock, 2001; Sangoi *et al.*, 2007). No entanto, apesar das panículas poderem ocorrer tanto no colmo principal quanto nos perfilhos, nem todos os perfilhos são produtivos.

A proporção entre colmo principal e perfilhos férteis é uma característica muito plástica, que varia muito, dependendo da espécie, da cultivar, da densidade de plantas e das práticas de manejo (Peltonen-Sainio *et al.*, 2007). Plantas de aveia com menor relação de massa entre colmo principal e perfilhos possuem maior potencial produtivo, pois o desenvolvimento de perfilhos tem maior sincronia com o do colmo principal (Almeida & Mundstock, 2001). O sincronismo de desenvolvimento dos perfilhos em relação ao colmo principal é importante para a sobrevivência dos primeiros e é dependente de práticas agronômicas (Deiss *et al.*, 2014; Sangoi *et al.*, 2007). A sobrevivência de perfilhos e o sincronismo são

importantes para o rendimento final, por serem determinantes do número de panículas por unidade de área (Peltonen-Sainio *et al.*, 2007).

A densidade de plantas na lavoura tem influência na determinação da sobrevivência de perfilhos. Alta população de plantas altera a qualidade de luz incidente sobre o dossel (relação entre luz vermelho e vermelho extremo) e a planta percebe esta alteração através dos fitocromos (Lambers *et al.*, 2008). Ao perceberem a alteração da qualidade de luz, as plantas de aveia modulam seu crescimento e perfilhamento. Assim, a condição de alta população eleva a competição por fatores ambientais e, então, a planta prioriza o desenvolvimento do colmo principal em detrimento de perfilhos (Almeida & Mundstock, 2001). Desta forma, quanto maior a densidade de plantas, maior é a probabilidade de não sobrevivência de perfilhos, resultando em maior produção de perfilhos não férteis. Apesar disto, os perfilhos não férteis possivelmente são fornecedores de assimilados para o colmo principal.

A densidade de plantas também tem efeito sobre os demais componentes do rendimento. O aumento da densidade de plantas reduz o número de panículas produzidas por planta e o número de grãos por panícula, no entanto, até certo ponto, o oposto é observado para número de panículas por unidade de área (Almeida *et al.*, 2003).

Os diferentes componentes do rendimento se relacionam entre si. Quanto maior a população de plantas, menor é a sobrevivência de perfilhos e a produção de perfilhos férteis (Almeida & Mundstock, 2001), o que resulta em alterações no número de panículas por unidade de área. Esse último interfere no número e na sobrevivência de flores por espigeta da panícula (González-Navarro *et al.*, 2015), definindo o número de grãos por panícula que, por sua vez, interfere na massa

individual do grão (Sanchez-Garcia *et al.*, 2013). Desta forma, o estudo isolado destes componentes pode conduzir a resultados equivocados.

2.4 Dinâmica do acúmulo de massa seca nos grãos de aveia

A aveia e o trigo possuem estruturas e desenvolvimento de inflorescência diferentes. O desenvolvimento da panícula de aveia ocorre da espiguetas terminal em direção à espiguetas basal, enquanto no trigo o desenvolvimento ocorre de forma mais síncrona (Rajala & Peltonen-Sainio, 2011). Os estádios de desenvolvimento de espiguetas e o momento da polinização diferem fortemente dentro da panícula e, possivelmente, influenciam o peso dos grãos. O progresso de polinização da espiguetas terminal até espiguetas basal leva até mais do que 12 dias (Rajala & Peltonen-Sainio, 2004), o que para as condições do sul do Brasil pode corresponder a mais de 200 graus-dias.

A posição de inserção da espiguetas na panícula e da flor na espiguetas determina a capacidade de dreno do grão e, portanto, determina a potencial massa do grão (Rajala & Peltonen-Sainio, 2011). Como as espiguetas de aveia podem conter um, dois, três ou mais grãos (Welch, 1995), os grãos primários são maiores que os secundários, que são maiores que os terciários, se estes estiverem presentes. Por conta disto, a distribuição do tamanho de grãos é geralmente representada como uma população multimodal na cultura da aveia (Doehlert *et al.*, 2002).

Alguns fatores são destacados como atuadores na definição do dreno preferencial, isto é, que definem qual grão tem prioridade na translocação de fotoassimilados. A morfologia do floema e do local de descarregamento de assimilados podem apresentar obstáculos que dificultam o transporte destes fotoassimilados (Yang *et al.*, 2002). Diante disto, o grão que apresenta preferência

de dreno possivelmente apresenta menor resistência à translocação de assimilados. Em adição, a interconversão de carboidratos é necessária na manutenção do fluxo de assimilados para o interior do dreno. Nesse contexto, as enzimas invertase, sacarose fosfato sintase e sacarose sintase apresentam papel central (Bihmidine *et al.*, 2013). Ainda, a baixa taxa de divisão celular também pode diminuir a força de dreno, apresentando-se como uma limitação física ao acúmulo de assimilados (Li *et al.*, 2013).

Apesar de serem determinados em momentos diferentes durante a estação de crescimento, o número e a massa individual de grãos são inter-relacionados (Peltonen-Sainio *et al.*, 2007). Tal fato resulta em capacidade da planta em compensar, até certo ponto, o baixo número de grãos por unidade de área pelo aumento de sua massa seca.

2.5 Massa seca acumulada e rendimento de grãos

A massa seca acumulada é uma função da interceptação da luz e da eficiência no uso da radiação (Reynolds *et al.*, 2012). A interceptação da luz pode ser incrementada pela otimização do tamanho do dossel (folhas grandes e numerosas), pela arquitetura (folhas eretas) e longevidade (vigor precoce e senescência tardia), enquanto um incremento de fotossíntese é necessário para elevar a eficiência no uso da radiação (Reynolds *et al.*, 2012).

O dossel de plantas com maior potencial produtivo é aquele em que a cobertura total é desenvolvida rapidamente após a semeadura e o sombreamento das folhas mais baixas é reduzido pela presença de folhas eretas (Welch, 1995). Tal fato pode aumentar a eficiência de interceptação da radiação (Reynolds *et al.*, 2012).

A quantidade de massa seca sintetizada entre a antese e a maturação depende do momento de senescência da planta, sendo a senescência tardia considerada favorável ao rendimento de grãos (Gregersen *et al.*, 2013). Folhas que permanecem por um período maior de tempo fotossinteticamente ativas, são uma das razões do alto potencial produtivo de cultivares modernas de cereais (Welch, 1995). Isto porque os assimilados produzidos pela fotossíntese são fundamentais para enchimento de grãos (Xie *et al.*, 2016). Logo se a fotossíntese se mantém ativa por um período maior de tempo, há a probabilidade de se obter grãos de maior massa individual.

Fisiologicamente, o rendimento de grãos é o produto da massa seca da planta e o índice de colheita (Xie *et al.*, 2016). O índice de colheita, definido pela relação entre o rendimento de grãos da cultura e a produção de massa seca acima do solo, define diretamente a alocação de massa no grão e, indiretamente, a partição entre grãos e produção de palha (Dai *et al.*, 2016). Em trigo, o índice de colheita tem sido altamente incrementado com o uso de genes de nanismo, que está estreitamente relacionado ao progresso do rendimento de grãos (Sanchez-Garcia *et al.*, 2013). O índice de colheita pode ser elevado pelo incremento de rendimento de grãos sem aumentar proporcionalmente a matéria seca da parte vegetativa ou, então, otimizando a partição de massa para o grão.

A produção de massa seca no período que antecede a floração, pode ser utilizada para determinar a densidade ideal de plantas de aveia. Esta produção de massa representa o potencial de investimento na formação de grãos, contanto que seu índice de colheita seja levado em consideração (Almeida *et al.*, 2003). A massa acumulada pela planta no período pré-antese tem sido destacada como determinante do rendimento final de grãos (Xie *et al.*, 2016). Isto pode ser explicado pelo fato de que plantas com maior massa podem apresentar maior área

fotossintética para produção de carboidratos, bem como panículas maiores e grãos de maior massa (Boukerrou & Rasmusson, 1990; Xie *et al.*, 2016), além de terem maior arcabouço para resistência a estresses.

Durante o enchimento de grãos, os assimilados fornecidos aos grãos são provenientes da fotossíntese e da realocação de fotoassimilados folhas e colmos (Xie *et al.*, 2016). Em condições de ambiente favorável, grande parte da massa seca do grão é devida à assimilação pós-antese, no entanto condições desfavoráveis podem inibir a fotossíntese e reduzir a área foliar que supre a demanda de carbono dos grãos (Rebetzke *et al.*, 2008). Esta redução de carbono disponibilizado comumente resulta em baixos rendimentos de grãos em ambientes pouco favoráveis ou, então, a uma maior produção de grãos pequenos e enrugados que desvalorizam o preço do cereal (Ruuska *et al.*, 2006). O carbono assimilado pode ser temporariamente acumulado em colmos e bainhas foliares durante os últimos estádios de desenvolvimento de cereais (Rebetzke *et al.*, 2008).

O *pool* de carbono não estrutural acumulado pode sustentar a taxa de enchimento de grãos quando a fotossíntese declinar (Dreccer *et al.*, 2014). Em muitas espécies, incluindo a aveia e outros cereais de inverno, este carboidrato é armazenado na forma de carboidratos solúveis como frutanas, hexoses e sacarose (Ruuska *et al.*, 2006). Estima-se que a contribuição do total de carboidratos solúveis em água para o rendimento pode ser maior que 50%, dependendo das condições do ambiente (Rebetzke *et al.*, 2008).

2.6 Nitrogênio e o rendimento de grãos

As plantas absorvem nitrogênio do solo principalmente nas formas de amônio e nitrato (Xuan *et al.*, 2017). O nitrato absorvido é reduzido à nitrito pela enzima nitrato redutase e, então, o nitrito é reduzido à amônio pela enzima nitrito

redutase. O amônio tem papel chave no metabolismo do nitrogênio para a síntese de nitrogênio orgânico. As enzimas glutamato desidrogenase, glutamato sintase e glutamina sintetase são fundamentais para a conversão de amônia em glutamato (Taiz & Zeiger, 2013).

O nitrogênio é essencial para a fotossíntese foliar e para o desenvolvimento do dossel. O aparato fotossintético é o maior dreno de nitrogênio em plantas, sendo que a capacidade fotossintética da folha é positivamente correlacionada com o teor de N foliar (Poorter, 1998). O aumento da capacidade fotossintética é considerada necessário para o aumento do rendimento (Yao *et al.*, 2015). Portanto, plantas melhor nutridas por nitrogênio possuem maior concentração de clorofilas, aumentando a capacidade fotossintética e resultando em maiores rendimentos.

A posição da folha no dossel tem influência sobre sua importância para o rendimento de grãos. A quantidade de luz interfere na concentração de clorofila, fazendo com que as folhas da parte superior do dossel (que recebem maior radiação solar) apresentem maior teor de clorofila e, portanto, tenham maior contribuição para o rendimento de grãos (Werger & Hirose, 1991).

A disponibilidade de nitrogênio pode estender a duração da área foliar, atrasando a senescência e possibilitando um aumento de rendimento (Gregersen *et al.*, 2013). Além disto, nutrientes estruturais (particularmente o nitrogênio) podem ser parcialmente reciclados durante a senescência para o enchimento dos grãos (Gregersen *et al.*, 2013). Portanto, espera-se que plantas que possuam maior aporte de nitrogênio em seu tecido apresentam maior capacidade de enchimento de grãos.

A produção de massa seca da parte aérea e o rendimento de grãos da cultura da aveia são dependentes da dose de nitrogênio aplicada em cobertura, bem como de sua época de aplicação (Deiss *et al.*, 2014; Sangoi *et al.*, 2007). Por

ser pequena a participação dos perfilhos na formação do rendimento final, por conta da baixa sobrevivência ou produção de perfilhos inférteis (Almeida *et al.*, 2003), plantas melhor nutridas com nitrogênio podem elevar o rendimento de grãos por atuarem na manutenção de perfilhos férteis (Sangoi *et al.*, 2007).

A recomendação da dose de nitrogênio a ser aplicada em aveia, nos estados do Rio Grande de Sul e Santa Catarina, se baseia no teor de matéria orgânica do solo, na cultura precedente (gramínea ou leguminosa) e na expectativa de rendimento (COMISSÃO..., 2016). No entanto, como diversos fatores estão envolvidos na mineralização do nitrogênio no solo e a determinação da expectativa de rendimento ser muito complexa (o potencial produtivo pode variar muito conforme as condições ambientais de cada ano de cultivo) faz com que as reais necessidades das plantas não sejam supridas em muitas situações (Bredemeier *et al.*, 2013). Para tanto, a estimativa do teor de nitrogênio no tecido vegetal, por métodos práticos, precisos e em tempo real, pode ser importante para realizar adubações mais coerentes.

Métodos de determinação do teor de nitrogênio por análise de tecidos, como digestão Kjeldahl e combustão Dumas, têm sido largamente empregados para análise de plantas por serem altamente confiáveis na determinação do nitrogênio total, no entanto são análises destrutivas e que demandam muito tempo (Munoz-Huerta *et al.*, 2013). Diversos estudos apontam outras metodologias mais rápidas e não destrutivas para determinação do teor de nitrogênio na planta. O conteúdo de clorofila é altamente correlacionado com o teor de N da folha e, por conta disto, o clorofilômetro pode ser empregado para verificar o status de nitrogênio da planta (Ali *et al.*, 2014). Ainda, podem ser utilizados sensores ópticos como o Greenseker (Grohs *et al.*, 2009), as imagens multiespectrais (Zaman-Allah *et al.*, 2015) e as câmeras digitais convencionais (Li *et al.*, 2010).

2.7 Comportamento espectral da vegetação

A radiação incidente sobre um dossel interage com as plantas e resulta em três frações. Uma parte desta radiação é absorvida pelos pigmentos contidos na folha e participa na síntese de compostos, altera estruturas moleculares, acelera reações ou, ainda, destrói estruturas de uma molécula (Lambers *et al.*, 2008; Taiz & Zeiger, 2013). Outra parte é refletida pelas folhas e uma terceira parte da radiação, sofre o processo de transmissão (Novo, 2011; Ponzoni *et al.*, 2012). A proporção destas três frações sempre guarda o princípio da conservação de energia, expresso pela segunda lei da termodinâmica, cujas razões adimensionais são denominadas absorptância, reflectância e transmitância (Novo, 2011).

A reflectância é a propriedade de um objeto de refletir a radiação eletromagnética sobre ele incidente (Ponzoni *et al.*, 2012). A reflectância da vegetação possui uma curva bastante característica, mas que possui variações entre plantas dependendo da estrutura, pigmentos e conteúdo de água (Novo, 2011). Esta curva é denominada comportamento espectral da vegetação verde, sendo dividido em visível, infravermelho próximo e médio, para melhor compreensão do fenômeno (Figura 4).

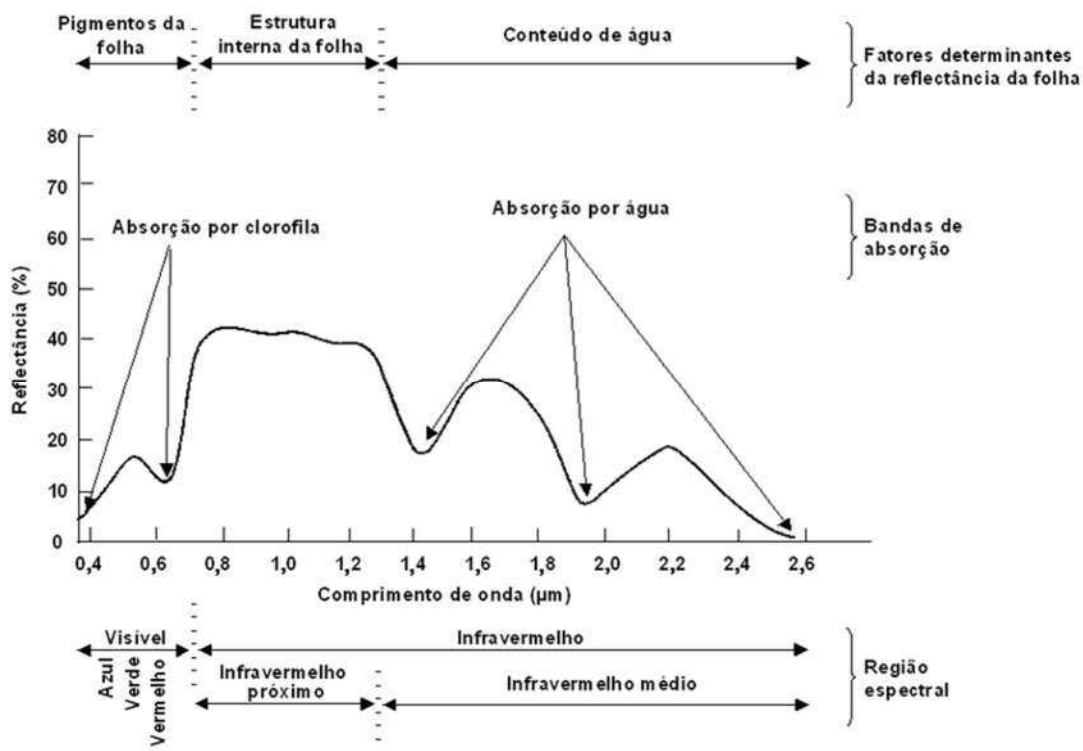


FIGURA 4. Curva típica de reflectância da vegetação verde. Fonte: Novo (2011).

Na região visível do espectro eletromagnético (0,40 μm a 0,72 μm) os pigmentos foliares são os fatores determinantes da reflectância (Figura 4). Os pigmentos absorvem luz solar, cuja energia é utilizada para fotossíntese e emitem parte da energia absorvida em forma de fluorescência (Taiz & Zeiger, 2013). Neste intervalo espectral, a reflectância e a transmitância apresentam baixos valores, sendo o pico máximo de reflectância encontrado próximo de 0,55 μm (Novo, 2011). As clorofilas a e b absorvem, principalmente, nas regiões azul e vermelho do espectro. A absorção de luz de comprimentos de onda mais curtos (por exemplo, luz azul) excita a clorofila para um estado de maior energia, onde a clorofila é instável, portanto, a clorofila rapidamente abandona uma parte da sua energia em forma de calor, de modo que o elétron elevado caia imediatamente para a órbita do elétron excitado pela luz vermelha (Campbell et al., 2008; Lambers *et al.*, 2008; Taiz & Zeiger, 2013). Assim, seja qual for o comprimento de onda da luz absorvida, a

clorofila atinge o mesmo estado de excitação após a captura do fóton (Lambers *et al.*, 2008).

A clorofila excitada pela luz pode emitir um fóton e retornar ao seu estado fundamental, sendo este processo denominado de fluorescência. O comprimento de onda da fluorescência é ligeiramente mais longo que o da luz absorvida, porque uma parte da energia de excitação é perdida antes do fóton de fluorescência ser emitido (Lambers *et al.*, 2008). Os pigmentos fotossintéticos absorvem a radiação principalmente, na região de 0,35 a 0,70 μm , enquanto sua emitância ocorre em picos largos nas regiões vermelha (0,68 μm) e vermelho-extremo (0,74 μm) do espectro (Campbell *et al.*, 2008). A radiação compreendida na região onde os pigmentos absorvem, é denominada radiação fotossinteticamente ativa (Lambers *et al.*, 2008).

Na região do infravermelho próximo (0,72 μm a 1,1 μm), ocorre pequena absorção da radiação e considerável espalhamento interno da radiação na folha (Ponzoni *et al.*, 2012). Nessa região espectral, a absorção é muito baixa e a reflectância é alta (Figura 4). A reflectância espectral das folhas no infravermelho próximo é o resultado da interação da energia incidente com as propriedades ópticas da folha, que dependem das estruturas celulares internas (Moreira, 2011). As múltiplas reflexões e refrações da radiação eletromagnéticas que ocorrem no mesófilo, associadas à descontinuidade entre os índices de refração das cavidades de ar intercelular e das paredes celulósicas hidratadas, determinam a reflectância nesta região do espectro (Moreira, 2011). Na região do infravermelho médio (1,1 μm a 3,2 μm), a reflectância é afetada pela absorção de luz pela água líquida (Figura 4).

A interceptação e a absorção da radiação fotossinteticamente ativa pela vegetação dependem de fatores morfológicos e fisiológicos. Entre os fatores

morfológicos, os mais importantes são relacionados à organização espacial das folhas, como densidade de cobertura vegetal, distribuição horizontal e vertical de folhas e ângulo de inserção vegetal (Novo, 2011; Taiz & Zeiger, 2013). Os fatores fisiológicos estão relacionados, por exemplo, à idade, à sanidade e à condição nutricional e hídrica da planta.

A capacidade fotossintética de uma planta aumenta desde a emergência da plântula até próximo à maturidade fisiológica, a partir de então, declina drasticamente até à senescência foliar (Lambers *et al.*, 2008; Taiz & Zeiger, 2013). Folhas senescentes possuem maior reflectância do que as folhas verdes. Isto porque, a degradação dos pigmentos fotossintéticos implica em menor absorção de radiação.

A condição nutricional da planta, especialmente no que diz respeito ao nitrogênio, afeta a quantidade de clorofilas presentes nos tecidos fotossintetizantes. Em caso de deficiência de nitrogênio, ocorre redução na concentração de clorofila e, por consequência, menor absorção de radiação (Moreira, 2011). Além do nitrogênio, nutrientes como magnésio, fósforo, potássio enxofre e cálcio também afetam o teor de clorofila, por ser constituinte da molécula de clorofila ou, então, por participar na síntese de enzima ou no transporte de energia durante a fotossíntese (Moreira, 2011; Taiz & Zeiger, 2013).

Utilizando as informações obtidas pela curva típica de reflectância da vegetação verde (Figura 4), foi elaborado o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). A ideia inicial era utiliza-lo no acompanhamento da dinâmica vegetativa do planeta Terra, através de imagens provenientes de satélites (Rouse *et al.*, 1973). Posteriormente, outras funções foram atribuídas a este índice, principalmente na agricultura com o uso de sensores ópticos proximais. Na determinação do NDVI são utilizadas as reflectâncias no vermelho e no

infravermelho próximo são utilizadas para a determinação deste índice vegetativo, conforme:

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_{vp}}{\rho_{ivp} + \rho_{vp}} = \frac{\text{Infravermelho próximo} - \text{vermelho}}{\text{infravermelho próximo} + \text{vermelho}} \quad (\text{EQUAÇÃO 1})$$

Conforme já comentado anteriormente, a reflectância no infravermelho próximo reflete a matéria seca do dossel, enquanto o vermelho a quantidade de clorofila presente no tecido da planta (MOREIRA, 2011).

A estimativa do NDVI através de sensores ópticos proximais é influenciada por diferentes fatores. A presença de água no dossel, a densidade de plantas, o genótipo, o estágio fenológico, a nutrição de plantas, a presença de estresses abióticos e plantas daninhas são exemplos de fatores que podem influenciar a estimativa do NDVI e, portanto, introduzem ruídos no índice que podem modificar a interpretação do objetivo final. Por exemplo, a presença de água no dossel em decorrência de precipitação pluviométrica ou orvalho reduz o valor estimado de NDVI, pois a água tem a característica de absorver a radiação na região do infravermelho próximo (Novo, 2011).

Em alternativa ao NDVI o uso de imagens digitais obtidas por câmeras digitais convencionais tem tomado destaque. Estas imagens apresentam a refletância do dossel nos comprimentos de ondas vermelho, verde e azul (RGB). Portanto, é possível estimar alguns índices utilizando apenas a região visível do espectro de luz (Fernandez-gallego *et al.*, 2019; Maimaitijiang *et al.*, 2019). Ainda, tem-se utilizado o índice de ocupação de plantas (IOP), que estima a relação de *pixels* da imagem que são ocupados por plantas e o que não são ocupados por plantas (Li *et al.*, 2010).

Assim como para o NDVI a obtenção dos índices através de cameras digitais convencionais devem seguir uma série de cuidados, uma vez que diversos fatores

podem apresentar impacto no valor estimado dos índices. Para tanto, as imagens são geralmente obtidas em condições ambientais de luminosidade semelhante, uma vez geralmente não é utilizado fonte de luz própria da camera (*flash*) e o sombreamento pode acarretar em erro de análise. Outros cuidados estão relacionados com as distorções nas bordas das imagens, qualidade das imagens, tamanho do *pixel* e a distância da câmera em relação ao dossel de plantas (Vian, 2015).

O clorofilômetro é outro sensor óptico utilizado na agricultura. Foi desenvolvido na década de 90 com o objetivo de obter o teor relativo de clorofila a partir da reflectância da região do vermelho (650nm) e do infravermelho (940nm), de modo a relacionar este valor com o estado nutricional da planta (MINOLTA, 1989). Entretanto, diferente do NDVI e das imagens obtidas por câmeras digitais convencionais, o clorofilômetro apresenta a necessidade de contato físico com a folha da cultura (Vian, 2015). Dessa forma, apresenta um valor pontual na planta e não do dossel por completo. Logo, a folha de determinação do teor relativo de clorofila deve ser definida conforme o objetivo do estudo.

2.8 Aplicações do comportamento espectral na agricultura

Os extensivos trabalhos em melhoramento e manejo de culturas foram responsáveis pela triplicação dos rendimentos de cereais nos últimos 50 anos (Pingali, 2012). Avanços contínuos nas técnicas disponíveis de melhoramento de plantas podem oferecer potencial para incrementar a taxa de ganho genético. No entanto, a exploração de novas ferramentas moleculares, particularmente a capacidade de analisar e decompor a genética de caracteres quantitativos, é limitada pela capacidade de fenotipagem (Cobb *et al.*, 2013; Phillips, 2010). Ainda, em decorrência da dificuldade de manejar adequadamente a lavoura, existe grande

diferença entre o rendimento de grãos alcançado por agricultores e o potencial produtivo da cultura, conhecida como lacuna de rendimento (Guilpart *et al.*, 2017).

Se tratando de manejo de plantas, a adubação nitrogenada é um dos fatores mais importantes e limitantes (Ladha *et al.*, 2016). A dificuldade em determinar a dose adequada de nitrogênio tem como consequência, em muitas situações, o não suprimento das reais necessidades da planta, levando a doses de nitrogênio acima ou abaixo da necessária (Bredemeier *et al.*, 2013). Em vista disto, o uso de ferramentas que possam estimar o potencial produtivo da lavoura *in situ*, de maneira rápida, precisa e em tempo real, pode otimizar a aplicação de nitrogênio, bem como permitir sua aplicação em taxa variável (Ali *et al.*, 2014; Bredemeier *et al.*, 2013).

O potencial produtivo é definido como o rendimento obtido por um genótipo bem adaptado sem condições limitantes referentes a água, nutrientes e estresses (Agustiani *et al.*, 2018; Evans, 1993). A estimativa de potencial produtivo pode ser empregada na identificação de oportunidades para incrementar o rendimento de grãos, bem como elevar a eficiência no uso de insumos. Os modelos de previsão do potencial produtivo são ferramentas robustas para estimação do potencial produtivo, inclusive em situações com condições limitantes de cultivo (Ittersum *et al.*, 2013).

Os modelos normalmente consideram condições climáticas, de solo e manejo para simular a influência do genótipo, ambiente e práticas de manejo no crescimento e desenvolvimento de plantas, bem como o rendimento de grãos (Agustiani *et al.*, 2018; Rötter *et al.*, 2015). Índices de vegetação são empregados na estimativa do potencial produtivo da lavoura, sendo que o NDVI é uma alternativa para estimar o potencial produtivo da lavoura de maneira rápida (Ali *et al.*, 2014; Bredemeier *et al.*, 2013; Shalunov *et al.*, 2017). Índices vegetativos podem

ser obtidos por sensores ópticos proximais e têm-se mostrado promissores tanto para a fenotipagem (Shakoor *et al.*, 2017) quanto para o manejo de plantas (Cao *et al.*, 2015; Erdle *et al.*, 2011). Assim, existem diversos potenciais de aplicação de sensores ópticos na agricultura (Tabela 1).

TABELA 1. Exemplos de potenciais aplicações de sensores ópticos na fenotipagem de plantas.

Sensor óptico	Potenciais aplicações
RGB / Stereo RGB	Biomassa, morfologia, altura, área foliar, sintomas de doenças, dinâmica de crescimento, características do rendimento, características de panícula, taxa de germinação, tempo de floração
3D Laser Scanner	Arquitetura de planta, altura, área foliar, estrutura do dossel
Multiespectral	Evolução da senescência, condição nutricional, degradação de pigmentos, eficiência fotossintética, conteúdo de água
Infravermelho termal (IR)	Transpiração, estresse térmico, senescência foliar, temperatura de folha/dossel, estresse hídrico, detecção de doenças e patógenos, avaliação da maturação de frutos
Infravermelho próximo (NIR) 700 a 1000nm	Transpiração, conteúdo de água, estresse térmico, índice de vegetação por diferença normalizada, índice de área foliar
Visual-Near IR (VNIR) 380 a 1000 nm	Índices vegetativos, estrutura foliar, conteúdo de lignina/flavonoides, conteúdo de água, senescência foliar, fluorescência da clorofila
ShortWave IR (SWIR) 900 a 2500nm	Conteúdo de água, lignina e celulose, fluorescência, índices vegetativos
Fluorescência	Condição fotossintética, rendimento quântico, estresse hídrico e térmico, arquitetura de folha e sanidade de planta

Adaptado de: Shakoor *et al.* (2017).

Fenotipagem de plantas é a denominação empregada ao conjunto de metodologias e protocolos utilizados para mensurar o crescimento, a arquitetura e a composição da planta com acurácia e precisão e em diferentes escalas de organização, de órgãos à planta inteira (Fiorani & Schurr, 2013). Apesar dos avanços obtidos nos últimos anos em tecnologias aplicáveis ao melhoramento genético de plantas, a fenotipagem tem sido um grande fator limitante (Araus &

Cairns, 2014; Jannink *et al.*, 2010). Isto porque a metodologia utilizada para a fenotipagem fisiológica é comumente detalhada, sofisticada e apresenta alto custo, o que impossibilita a aplicação da avaliação em uma quantidade significativa de genótipos (Ghanem; Marrou; Sinclair, 2015). As tecnologias de sistemas de sensoriamento podem ser aplicadas para elevar o levantamento de informações fenotípicas de plantas, acelerando o processo de melhoramento, aumentando a taxa de ganho genético e a resistência a doenças das diversas culturas (Shakoor *et al.*, 2017).

A fenotipagem a partir de sensores ópticos tem sido denominada como fenotipagem de alto rendimento (*High Throughput Phenotyping* - HTP). Isto porque tem sido recomendada para avaliação de um grande número de genótipos de maneira pouco ou não invasiva e destrutiva (Ghanem *et al.*, 2015; Shakoor *et al.*, 2017). Técnicas de sensoriamento podem ser implementadas *in situ* para o *screening* de um grande número de objetivos do melhoramento, incluindo potencial produtivo, adaptação a estresses bióticos e abióticos, condições limitantes e até mesmo características de qualidade do produto (Araus & Cairns, 2014).

Utilizando um veículo aéreo não tripulado Duan *et al.* (2017) monitoraram a dinâmica do NDVI em ensaios de melhoramento de trigo. A HTP foi capaz de capturar a variação do NDVI entre cultivares e tratamentos (por exemplo, irrigação, nitrogênio e semeadura). Foi encontrada alta correlação entre o NDVI e o rendimento final de grãos no estágio de florescimento ($R^2=0,82$), que pode ser levemente incrementada utilizando do NDVI ajustado para as interferências de solo e senescência foliar ($R^2=0,87$).

Em uma comparação entre sensores ativos e passivos para discriminar parâmetros de biomassa e condição de nutrição por nitrogênio em cultivares de trigo, Erdle *et al.* (2011) concluíram que os diversos índices empregados são

capazes de estimar com eficiência as variáveis analisadas. Foram utilizados 17 índices espectrais, nos estádios 3, 4 e 6 da escala de Zadoks. Os coeficientes de determinação mais altos encontrados para cada variável analisada pelos autores foram 0,84, 0,91, 0,91, 0,94, 0,90, respectivamente para massa seca da parte aérea, teor de N, absorção de N, massa fresca da parte aérea e índice de nutrição nitrogenada.

Utilizando-se do sensor comercial GreenSeeker, que estima o NDVI, Grohs *et al.* (2009) formularam modelos para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada. Os autores não encontraram efeito de espécie e de cultivares e, por conta disto, formularam modelos utilizando conjuntamente as cinco cultivares de trigo e cevada. Os modelos de regressão encontrados apresentaram coeficientes de determinação de 0,92 e 0,97 sobre resteva de soja e milho, respectivamente.

Os índices de reflectância podem ser empregados para detecção de estresses de plantas, por exemplo os causados por seca (Ihuoma & Madramootoo, 2017), doenças e pragas (Huang *et al.*, 2007; Shi *et al.*, 2017), metais pesados (Bandaru *et al.*, 2016), deficiência mineral (Mee *et al.*, 2017), salinidade (Peñuelas *et al.*, 1997) e por herbicida (Carter & Miller, 1994).

É menor o número de estudos sobre sensores ópticos na cultura da aveia em relação ao milho e ao trigo. No entanto, podem ser encontrados estudos de diferentes variáveis com o emprego de distintos sensores ópticos. Dentre eles, podem ser citados estudos de estimativa do índice de área foliar verde e fenologia com sensores proximais e remotos (Best & Harlan, 1985; Wittich & Kraft, 2008), avaliação de danos causados por geada, a partir de câmera digital convencional (Macedo-Cruz *et al.*, 2011), estimativa da concentração de nitrogênio, empregando o sistema LiDAR (*Light Detection and Ranging*) (Nevalainen *et al.*, 2013), além de estudos relacionados ao uso de câmera multiespectral equipada em veículo aéreo

não tripulado para estimativa do teor relativo de clorofila, da área foliar e da cobertura do solo (Franceschini *et al.*, 2017).

2.9 Referências bibliográficas

AGUSTIANI, N. et al. Simulating rice and maize yield potential in the humid tropical environment of Indonesia. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 101, n. 3, p. 10–19, 2018.

ALI, A. M. et al. Prediction of dry direct-seeded rice yields using chlorophyll meter, leaf color chart and GreenSeeker optical sensor in northwestern India. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 161, n. 4, p. 11–15, 2014.

ALMEIDA, M. L. De et al. Tillering does not interfere on white oat grain yield response to plant density. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 2, p. 253–258, 2003.

ALMEIDA, M. L. De; MUNDSTOCK, C. M. O afilhamento da aveia afetado pela qualidade da luz em plantas sob competição. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 393–400, 2001.

ARAUS, J. L.; CAIRNS, J. E. Field high-throughput phenotyping: The new crop breeding frontier. **Trends in Plant Science**, London, v. 19, n. 1, p. 52–61, 2014.

BANDARU, V. et al. Evaluating Leaf and Canopy Reflectance of Stressed Rice Plants to Monitor Arsenic Contamination. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Berna, v. 13, n. 606, p. 1–16, 2016.

BEST, R. G.; HARLAN, J. C. Spectral estimation of Green leaf area index of oats. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 17, n. 1, p. 27–36, 1985.

BIHMIDINE, S. et al. Regulation of assimilate import into sink organs: update on molecular drivers of sink strength. **Frontiers in Plant Science**, Berna, v. 4, n. 6, p. 1–15, 2013.

BOUKERROU, L.; RASMUSSEN, D. D. Breeding for High Biomass Yield in Spring Barley. **Crop Science**, Madison, v. 30, n. 1, p. 31, 1990.

BREDEMEIER, C. et al. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 1, p. 1147–1154, 2013.

CAMPBELL, P. K. E. et al. Contribution of chlorophyll fluorescence to the apparent vegetation reflectance. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 404, n. 2–3, p. 433–439, 2008.

CAO, Q. et al. Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 112, p. 54–67, 2015.

CARTER, G. A.; MILLER, R. L. Early Detection of Plant Stress by Digital Imaging within Narrow Stress-Sensitive Wavebands. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 302, n. 1, p. 295–301, 1994.

CARVALHO, F. I. F. et al. Potencial genético da aveia, como produtora de grãos, no sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 71–82, 1987.

CHEN, Y. et al. A stepwise, ‘test-all-positives’ methodology to assess gluten-kernel contamination at the serving-size level in gluten-free (GF) oat production. **Food Chemistry**, Oxford, v. 240, n. 12 2017, p. 391-395, 2018.

COBB, J. N. et al. Next-generation phenotyping: Requirements and strategies for enhancing our understanding of genotype-phenotype relationships and its relevance to crop improvement. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 126, n. 4, p. 867-887, 2013.

DAI, J. et al. Biomass and Bioenergy Harvest index and straw yield of five classes of wheat. **Biomass and Bioenergy**, London, v. 85, p. 49–53, 2016.

DE MORI, C.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. dos. **Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da aveia**. Passo Fundo: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2012. 2012 p.

DEISS, L. et al. Oat tillering and tiller traits under different nitrogen levels in an eucalyptus agroforestry system in subtropical Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 1, p. 71-78, 2014.

DOEHLERT, D. C.; MCMULLEN, M. S.; RIVELAND, N. R. Sources of variation in oat kernel size. **Cereal Chemistry**, Saint Paul, v. 79, n. 4, p. 528-534, 2002.

DRECCER, M. F.; BARNES, L. R.; MEDER, R. Quantitative dynamics of stem water soluble carbohydrates in wheat can be monitored in the field using hyperspectral reflectance. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 159, n.1 p. 70-80, 2014.

DUAN, T. et al. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 210, n. 1 p. 71–80, 2017.

ERDLE, K.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 124, n. 1, p. 74–84, 2011.

EVANS, L. T. **Crop evolution, adaptation and yield**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 514 p.

FEDERIZZI, L. C. et al. Importância econômica da cultura. In: LÂNGARO, N. C.; DE CARVALHO, I. Q. (Ed.). **Indicações técnicas para a cultura da aveia**. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2014. p. 11-23.

FEDERIZZI, L. C.; PACHECO, M. P. Programa de Melhoramento Genético de Aveia da UFRGS: 35 anos de história. In: Reunião da comissão brasileira de pesquisa de aveia, 24. 2009, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 2009.

FERNANDEZ-GALLEGO, J. A.; KEFAUVER, S. C.; VATTER, T. Low-cost assessment of grain yield in durum wheat using RGB images. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 105, n.1, p. 146-156, 2019.

FIORANI, F.; SCHURR, U. Future Scenarios for Plant Phenotyping. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 64, n. 1, p. 267-291, 2013.

FISCHER, R. a. FARRER REVIEW. Wheat physiology: a review of recent developments. **Crop and Pasture Science**, Clayton, v. 62, n. 2, p. 95, 2011.

FRANCESCHINI, M. H. D. et al. Intercomparison of unmanned aerial vehicle and ground-based narrow band spectrometers applied to crop trait monitoring in organic potato production. **Sensors**, Basel, v. 17, n. 6, p. 1-36, 2017.

GHANEM, M. E.; MARROU, H.; SINCLAIR, T. R. Physiological phenotyping of plants for crop improvement. **Trends in Plant Science**, London, v. 20, n. 3, p. 139-144, 2015.

GONZÁLEZ, F. G.; MIRALLES, D. J.; SLAFER. Wheat floret survival as related to pre-anthesis spike growth. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 14, p. 4889-4901, 2011.

GONZÁLEZ-NAVARRO, O. E. et al. Dynamics of floret development determining differences in spike fertility in an elite population of wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 172, p. 21-31, 2015.

GREGERSEN, P. L. et al. Plant senescence and crop productivity. **Plant Molecular Biology**, Dordrecht, v. 82, n. 6, p. 603-622, 2013.

GROHS, D. S. et al. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 101-112, 2009.

GUILPART, N. et al. Estimating yield gaps at the cropping system level. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 206, p. 21–32, 2017.

HUANG, Y.; XIAO, B.; XIONG, L. Characterization of a stress responsive proteinase inhibitor gene with positive effect in improving drought resistance in rice. **Planta**, New York, v. 226, n. 1, p. 73-85, 2007.

IHUOMA, S. O.; MADRAMOOTOO, C. A. Recent advances in crop water stress detection. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 141, p. 267-275, 2017.

ITTERSUM, M. K. Van et al. Yield gap analysis with local to global relevance - A review. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 143, p. 4–17, 2013.

JANNINK, J.-L.; LORENZ, A. J.; IWATA, H. Genomic selection in plant breeding: from theory to practice. **Briefings in Functional Genomics**, Oxford, v. 9, n. 2, p. 166–177, 2010.

KESER, M. et al. Genetic gains in wheat in Turkey: Winter wheat for dryland conditions. **The Crop Journal**, Beijing v. 5, n. 6, p. 533-540, 2017.

- KIRBY, E. J. M. Analysis of leaf, stem and ear growth in wheat from terminal spikelet stage to anthesis. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 18, n. 2, p. 127-140, 1988.
- LADHA, J. K. et al. Global nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice, and wheat production systems. **Nature Scientific Reports**, London, v. 6, p. 1-9, 2016.
- L Aidig, F. et al. Breeding progress, variation, and correlation of grain and quality traits in winter rye hybrid and population varieties and national on-farm progress in Germany over 26 years. **Theoretical and Applied Genetics**, New York v. 130, n. 5, p. 981-998, 2017.
- LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L. **Plant Physiological Ecology**. 2nd ed. New York: Springer New York, 2008. 622 p.
- LI, X. T. et al. Critical factors for grain filling of erect panicle type Japonica rice cultivars. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, n. 5, p. 1404-1410, 2013.
- LI, Y. et al. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 118, n. 3, p. 221–227, 2010.
- MACEDO-CRUZ, A. et al. Digital image sensor-based assessment of the status of oat (*Avena sativa* L.) crops after frost damage. **Sensors**, Basel, v. 11, n. 6, p. 6015-6036, 2011.
- MAHADEVAN, M. et al. The critical period for yield determination in oat (*Avena sativa* L.). **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 199, p. 109–116, 2016.
- MAIMAITIJIANG, M. et al. Vegetation Index Weighted Canopy Volume Model (CVMvi) for soybean biomass estimation from Unmanned Aerial System-based RGB imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 151, n. 5, p. 27-41, 2019.
- MEE, C. Y.; BALA, S. K.; MOHD, A. H. Detecting and Monitoring Plant Nutrient Stress Using Remote Sensing Approaches: A Review. **Asian Journal of Plant Sciences**, Faisalabad, v. 16, n. 1, p. 1-8, 2017.
- MINOLTA CAMERA Co. Ltda. **Manual for chlorophyll meter SPAD 502**. Osaka, Minolta, Radiometric Instruments divisions. p.22, 1989.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2011. 422 p.
- MUNOZ-HUERTA, R. F. et al. A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. **Sensors**, Basel, v. 13, n. 8, p. 10823-10843, 2013.
- NEVALAINEN, O. et al. Nitrogen concentration estimation with hyperspectral LIDAR. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Antalya, v. 5, n. 2, p. 205-210, 2013.
- NOVO, E. M. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2011. 308 p.

PELTONEN-SAINIO, P. et al. Grain number dominates grain weight in temperate cereal yield determination: Evidence based on 30 years of multi-location trials. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 100, n.2-3, p. 179-188, 2007.

PEÑUELAS, J. et al. Visible and near-infrared reflectance assessment of salinity effects on barley. **Crop science**, Madison, v.37, n.1, p.198-202, 1997.

PHILLIPS, R. L. Mobilizing science to break yield barriers. **Crop Science**, Madison, v. 50, n. 4, p. 99-108, 2010.

PINGALI, P. Green Revolution: Impacts, Limits, and the path ahead. **Proceedings of the National Academy of Science**, Whashington, v. 109, n. 31, p. 12302–12308, 2012.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012. 176 p.

POORTER, H. Photosynthetic nitrogen-use efficiency of species that differ inherently in specific leaf area. **Growth**, Lakeland, p. 26-37, 1998.

PRIMAVESI, A. C.; RODRIGUES, A. de A.; GODOY, R. **Recomendações técnicas para o cultivo de aveia**. São Carlos: EMBRAPA, 2000. 39 p.

RAJALA, A.; PELTONEN-SAINIO, P. Pollination dynamics, grain weight and grain cell number within the inflorescence and spikelet in oat and wheat. **Agricultural Sciences**, Wuhan, v. 02, n. 3, p. 283–290, 2011.

RAJALA, A.; PELTONEN-SAINIO. Intra-plant variation for progress of cell division in developing oat grains: A preliminary study. **Agricultural and Food Science**, Jokioinen, v. 13, n. 1–2, p. 163-169, 2004.

RASANE, P. et al. Nutritional advantages of oats and opportunities for its processing as value added foods - a review. **Journal of Food Science and Technology**, New Delhi, v. 52, n. 2, p. 662-675, 2015.

REBETZKE, G. J. et al. Quantitative trait loci for water-soluble carbohydrates and associations with agronomic traits in wheat. **Australian Journal of Agricultural Research**, Black Mountain, v. 59, n. 10, p. 891-905, 2008.

REYNOLDS, M. et al. Achieving yield gains in wheat. **Plant Cell and Environment**, Malden, v. 35, n. 10, p. 1799-1823, 2012.

RÖTTER, R. P. et al. Use of crop simulation modelling to aid ideotype design of future cereal cultivars. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 66, n. 12, p. 3463-3476, 2015.

ROUSE, J.W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **In. NASA ERTS Symposium**, v.3, p.309-317, 1973.

RUUSKA, S. A. et al. Genotypic variation in water-soluble carbohydrate accumulation in wheat. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 33, n. 9, p. 799-809, 2006.

SANCHEZ-GARCIA, M. et al. Genetic improvement of bread wheat yield and associated traits in Spain during the 20th century. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 151, p. 1–14, 2013.

SANGOI, L. et al. Características agronômicas de cultivares de trigo em resposta à época da adubação nitrogenada de cobertura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 6, p. 1564-1570, 2007.

SHAKOOR, N.; LEE, S.; MOCKLER, T. C. High throughput phenotyping to accelerate crop breeding and monitoring of diseases in the field. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 38, p. 184-192, 2017.

SHI, Y. et al. Detection and discrimination of pests and diseases in winter wheat based on spectral indices and kernel discriminant analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 141, p. 171–180, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: ARTMED, 2013.

VIAN, A. L. **Sensores de vegetação para estimativa in situ do potencial produtivo na cultura do milho**. 2015. 68 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

WELCH, R. W (Ed.). **The oat crop**: production and utilization. London: Chapman & Hall, 1995. 584p.

WERGER, M. J. A.; HIROSE, T. Leaf nitrogen distribution and whole canopy photosynthetic carbon gain in herbaceous stands. **Vegetatio**, Belgium, v. 97, n. 1, p. 11-20, 1991.

WITTICH, K. P.; KRAFT, M. The normalised difference vegetation index obtained from agrometeorological standard radiation sensors: A comparison with ground-based multiband spectroradiometer measurements during the phenological development of an oat canopy. **International Journal of Biometeorology**, New York, v. 52, n. 3, p. 167-177, 2008.

XIE, Q.; MAYES, S.; SPARKES, D. L. Preanthesis biomass accumulation of plant and plant organs defines yield components in wheat. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 81, p. 15-26, 2016.

XUAN, W.; BEECKMAN, T.; XU, G. Plant nitrogen nutrition: sensing and signaling. **Current Opinion in Plant Biology**, London v. 39, p. 57-65, 2017.

YANG, J. et al. Grain and dry matter yields and partitioning of assimilates in Japonica/Indica hybrid rice. **Crop Science**, Madison, p. 766–772, 2002.

YAO, H. et al. Plant density alters nitrogen partitioning among photosynthetic components, leaf photosynthetic capacity and photosynthetic nitrogen use efficiency in field-grown cotton. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 184, p. 39–49, 2015.

ZAMAN-ALLAH, M. et al. Unmanned aerial platform-based multi-spectral imaging for field phenotyping of maize. **Plant Methods**, London, v. 11, n. 1, p. 1-10, 2015.

3 CAPÍTULO 1

Acúmulo de massa seca no grão em genótipos de aveia-branca

3.1 Introdução

O melhoramento convencional tem se baseado principalmente na seleção para rendimento de grãos *per se*, juntamente com a resistência a estresses bióticos e abióticos. A compreensão da base fisiológica e genética do rendimento de grãos pode aprimorar substancialmente essa estratégia (Xie *et al.*, 2016a). O rendimento de grãos é uma característica complexa, mas que pode ser dissecada em características relativamente mais simples que permitem seu melhor entendimento, como por exemplo o número de panículas por unidade de área, número de grãos por panícula e a massa de grãos (Laidig *et al.*, 2017; Peltonen-Sainio *et al.*, 2007).

A definição do rendimento de grãos de aveia segue um processo sequencial. Primeiramente, o número de panículas produzidas por plantas é definido, seguido pelo número de grãos por panícula e, então, a massa de grãos (Almeida *et al.*, 2003). Então, cronologicamente, a massa de grãos é o último componente a ser formado, sendo definido pela capacidade de acúmulo de massa no grão (Kim *et al.*, 2011; Yan *et al.*, 2019). No entanto, o acúmulo de massa nos grãos é influenciado por uma série de fatores que podem limitar o rendimento de grãos.

Tem-se que a ocorrência de condições limitantes durante o desenvolvimento da panícula e gametogênese reduzem o número de grãos. Por outro lado, estresses que ocorrem após a antese reduzem a massa de grãos (Dolferus *et al.*, 2011). Então, apesar da massa do grão ser o último componente do rendimento de grãos a ser definido, em determinadas condições esse pode ser drasticamente reduzido, limitando o rendimento de grãos (Okamura *et al.*, 2018; Peltonen-Sainio *et al.*, 2007). Isso porque, caso ocorra algum fator limitante durante o enchimento de grãos, mesmo que a planta apresente elevado número de grãos por unidade de área, se esses apresentarem reduzida massa seca, o rendimento de grãos será limitado. Por conta disso, o estudo de como ocorre a formação da massa de grãos

é crucial para evitar a instabilidade da massa de grãos em diferentes condições ambientais de cultivo (Okamura *et al.*, 2018).

A remobilização e disponibilidade de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, para o grão pode estimular a manutenção do processo de enchimento de grãos mesmo em condições de estresse (Jiang *et al.*, 2016; Lv *et al.*, 2017; Mu *et al.*, 2018). O nitrogênio tem duas funções principais na determinação do rendimento de grãos: (1) estabelecimento e manutenção da capacidade fotossintética da planta (Xie *et al.*, 2016a) e (2) definição da capacidade de dreno dos grãos (Tegeder & Hammes, 2018; Wei *et al.*, 2018). Já a disponibilidade de fósforo durante o enchimento de grãos pode aumentar a capacidade de dreno do grão por retardar a senescência foliar (Lv *et al.*, 2017).

Grande parte do nitrogênio acumulado no grão é obtido através de sua remobilização foliar (Mu *et al.*, 2018). Plantas que crescem sob baixa disponibilidade de nitrogênio, apresentam baixas quantidades de nitrogênio acumulado em tecido vegetal e, conseqüentemente, a baixa remobilização de nutrientes e fotoassimilados acarretará em acelerada senescência foliar em relação a plantas bem supridas (Xie *et al.*, 2016a). Do mesmo modo, plantas bem supridas em fósforo retardam a senescência foliar, aumentando a duração do período de enchimento de grãos (Lv *et al.*, 2017).

A massa seca do grão é o resultado do produto entre a duração e a taxa de acúmulo de massa seca no grão (Yan *et al.*, 2019). Logo, a maior duração efetiva de enchimento, acompanhada de altas taxas de acúmulo de massa seca são desejáveis para a obtenção de uma expressiva massa seca do grão. O acúmulo de massa no grão de cereais é inicialmente lento (fase lag), depois a taxa de acúmulo entra numa fase linear (fase log) até atingir o seu máximo e, então, decresce até zero (fase estacionária) quando o grão atinge a massa máxima na maturidade

fisiológica (Egli, 2017; Yang *et al.*, 2008). Então, o enchimento de grãos de cereais pode ser subdividido em três fases, sendo a fase linear a mais importante, isto porque a maioria da massa seca do grão é acumulada durante essa fase. Por conta disso, sua duração é denominada duração efetiva do enchimento de grãos (Egli, 2017).

Compreender o comportamento de enchimento de grãos pode ser uma ferramenta interessante no incremento de rendimento de grãos de aveia. Isto porque este, apesar de sua ordem cronológica, pode limitar o rendimento de grãos em situações estressantes. Apesar de haver informações na literatura pertinentes ao comportamento de enchimento de grãos em cereais (Jiang *et al.*, 2016; Kennedy *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2011; Okamura *et al.*, 2018; Yan *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2008), não são encontrados detalhes para a cultura da aveia.

Diante do exposto, visando preencher a lacuna de conhecimento a respeito do comportamento do enchimento de grãos em aveia branca, o objetivo deste trabalho foi determinar o componente do enchimento de grãos que apresenta maior influência na capacidade da planta em produzir grãos maiores e o efeito que os nutrientes nitrogênio e fósforo apresentam sobre o comportamento de acúmulo de massa no grão, de modo a fornecer informação para programas de melhoramento desta cultura.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Descrição do local de desenvolvimento do experimento

Os experimentos foram conduzidos a campo, nas safras 2017 e 2018, na estação experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA-UFRGS), localizada no município de Eldorado do Sul, situada na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul, nas coordenadas geográficas

30°05'22" S e 51°39'08" W. O clima é caracterizado como subtropical de verão úmido quente, do tipo Cfa, conforme a classificação de Koppen (IPAGRO, 1979), com altitude média de 46 metros acima do nível do mar. O solo da área experimental pertence à unidade de mapeamento São Jerônimo, caracterizado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2008). Trata-se de um solo bem drenado, com relevo ondulado e baixa fertilidade natural. No entanto, o experimento foi alocado em área plana e a fertilidade foi corrigida.

Anexo ao experimento foi instalada uma estação meteorológica para acompanhamento das condições ambientais durante o período de condução dos experimentos. A precipitação pluvial acumulada e a temperatura média do ar na safra 2017 (09/07/2017 a 09/11/2017) foi, respectivamente, 488 mm e 17,9°C. Enquanto na safra 2018 (19/06/2018 a 22/10/2018), 547 mm e 15,7°C (APÊNDICE 1).

3.2.2 Caracterização dos experimentos

Foram realizados dois experimentos para verificação do efeito de genótipos e de dose de nitrogênio no acúmulo de matéria seca no grão. Na safra 2017 foram selecionados genótipos representativos do programa de melhoramento de aveia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para constituírem os tratamentos. Os genótipos selecionados foram constituídos de quatro cultivares (URS Altiva, URS Corona, URS F Flete e URS Taura) e três linhagens pertencentes ao programa de melhoramento de aveia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS 146155-3, UFRGS 146173-1 e UFRGS 137117-2), totalizando sete genótipos de aveia-branca. As características dos genótipos e sua genealogia estão apresentadas na Tabela 1. Na safra 2018 foi conduzido apenas o genótipo URS Altiva, sob quatro diferentes doses de nitrogênio.

TABELA 1. Características e genealogia dos genótipos utilizados nos experimentos.

Genótipo	Características	Genealogia
URS Altiva	Genótipo de porte extremamente ereto, baixo afilhamento e precoce.	UFRGS 995090-2 / URS 21
URS Corona	Suscetível à ferrugem-da-folha.	UFRGS 987016-1 / UFRGS 970497-1
URS F Flete	Resistente à ferrugem-da-folha e ciclo tardio.	LA 9339E17 / LA 0-591-NZ 0553
URS Taura	Suscetível à ferrugem-da-folha e elevado rendimento de grãos.	UFRGS 970216-2 / UFRGS 970461
UFRGS 146155-3	Resistência ao acamamento e ciclo superprecoce.	UFRGS 066033-3 / UFRGS 0006183-2
UFRGS 146173-1	Resistente à ferrugem-da-folha.	Leggett / UFRGS 953270-4
UFRGS 137117-2	Resistente à ferrugem-da-folha e ciclo precoce.	UFRGS 047053-1 / URS Taura

Na safra 2017, os genótipos foram cultivados no delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições. As unidades experimentais consistiram em cinco linhas de cinco metros de comprimento, espaçadas em 0,20 metros entre si. De forma mecanizada, a semeadura foi realizada em 23 de junho de 2017, com densidade ajustada para 350 sementes aptas a germinar por metro quadrado. A cultura antecessora ao cultivo foi a soja. A adubação de base foi de 350 kg ha⁻¹ de fertilizante da fórmula 5-30-15 (N-P-K). Na adubação nitrogenada de cobertura foi utilizada ureia, dividindo em duas aplicações de 35 kg de nitrogênio ha⁻¹, quando as plantas se encontravam nos estádios fenológicos de três e seis folhas expandidas (Tabela 2). O manejo de doenças foi realizado sempre que necessário.

TABELA 2. Quantidade total e parcial de nitrogênio aplicada (kg de N ha⁻¹) na adubação de base e nos estádios fenológicos de três e seis folhas completamente expandidas, em cada safra e tratamento.

Safra	Quantidade total de N aplicada	Momento de aplicação da adubação nitrogenada		
		Base	três folhas	seis folhas
2017	87,5 kg de N ha ⁻¹	17,5	35	35
2018	0 kg de N ha ⁻¹	0	0	0
2018	30 kg de N ha ⁻¹	10	10	10
2018	60 kg de N ha ⁻¹	20	20	20
2018	90 kg de N ha ⁻¹	30	30	30

No experimento da safra 2018 foi conduzido o genótipo URS Altiva nos tratamentos de 0, 30, 60 e 90 kg de nitrogênio ha⁻¹. A aplicação de base de nitrogênio ocorreu por ocasião da semeadura, via manual, de acordo com a dose do tratamento. Foram realizadas duas adubações nitrogenadas de cobertura. A primeira quando as plantas se encontravam no estágio fenológico de três folhas completamente expandidas e a segunda com seis folhas completamente expandidas. As três aplicações de nitrogênio foram divididas igualmente, conforme a dose do tratamento (Tabela 2).

As unidades experimentais consistiram em cinco linhas de oito metros de comprimento, espaçadas em 0,20 metros entre si. De forma mecanizada, a semeadura foi realizada em 15 de junho de 2018, com densidade ajustada para 350 sementes aptas a germinar por metro quadrado. A cultura antecessora ao cultivo foi a soja. A adubação de base foi de 400kg ha⁻¹ de fertilizante da fórmula 0-20-20 (N-P-K). O manejo de doenças foi realizado sempre que necessário.

O desenvolvimento das panículas foi acompanhado a partir do florescimento. Quando observado o início do acúmulo de amido nos grãos do terço superior da panícula deu-se procedimento à coleta. A partir de então, com periodicidade bissemanal, foram coletados cinco colmos principais de cada unidade experimental que, posteriormente, foram secos a temperatura de 60°C. Foram coletados apenas

colmos principais para evitar possíveis variações pertinentes a diferenças no desenvolvimento da panícula entre colmos principais e perfilhos. As datas de coleta da safra 2017 estão apresentadas no APÊNDICE 2, enquanto da safra 2018 no APÊNDICE 3.

As panículas foram separadas da parte vegetativa da planta, medidas e divididas em três terços, isto porque a aveia apresenta o ápice da panícula em desenvolvimento mais avançado que a base da panícula. Os terços foram denominados como terço superior, terço médio e terço inferior. Com o objetivo de evitar a perda de grãos, debulhou-se os grãos manualmente. Posteriormente, os grãos com casca foram secos a 60°C, contados e a massa seca foi determinada. Com esse procedimento, obteve-se o número de grãos por terço e dividindo-se a massa total dos grãos de cada terço pelo número de grãos do terço em específico, obteve-se a massa individual do grão. Como foram realizadas coletas periódicas, obteve-se a curva que caracteriza o enchimento de grão de cada terço dentro de cada genótipo avaliado.

Os grãos (grão + casca) dos genótipos URS Taura e URS Altiva foram moídos e o teor de nitrogênio foi determinado pelo método Kjeldahl e o fósforo pelo método azul de molibdato, ambas análises realizadas conforme metodologia descrita em Tedesco *et al.* (1995). Através do produto entre massa individual do grão e o teor de nitrogênio do grão, obteve-se a quantidade acumulada de nitrogênio no grão. Seguindo o mesmo procedimento utilizado para os grãos, determinou-se o teor de nitrogênio na parte vegetativa da planta.

3.2.3 Análise estatística

Foram testados modelos matemáticos para descrever a relação entre a massa seca do grão e os dias após o florescimento de cada cultivar. Um modelo

derivado da função de probabilidade de Weibull foi o que apresentou o melhor ajuste. A função de Weibull é muito empregada nos diversos estudos de crescimento de plantas por ser flexível (Thornley & France, 2007). O modelo Weibull modificado empregado foi (Meade *et al.*, 2013):

$$M_{\text{grão}} = M_{\text{final}} - (D)\exp^{-at^b} \quad (\text{EQUAÇÃO 1})$$

Os parâmetros descrevem a massa máxima do grão (M_{final}), a diferença entre as massas máxima e mínima do grão (D), o formato da curva (a), a escala da curva (b) e a variável independente relativa ao número de dias após o florescimento (t).

Para cada genótipo, foi realizado o ajuste da curva da massa seca do grão (variável dependente) em relação ao dia após o florescimento (variável independente). Para isto, utilizou-se o procedimento NLIN do software estatístico SAS 9.4, cujo exemplo de programação é apresentado no APÊNDICE 4. O mesmo foi realizado para a quantidade acumulada de nitrogênio e fósforo.

Diante da curva ajustada para cada genótipo, foram extraídas algumas variáveis pertinentes ao comportamento do enchimento de grão (Tabela 3). Foi assumido que o período de duração do enchimento é compreendido entre 5 e 95% da massa final do grão (M_{final}), assumindo a diferença entre as massas máxima e mínima do grão (D), considerando a massa da casca do grão. Então, a taxa média de enchimento do grão foi obtida pela razão entre a diferença da massa seca do grão entre 5 e 95% da massa final pela duração do enchimento. A taxa máxima de enchimento de grão foi obtida pela primeira derivada da Equação 1 igualada a zero. Para facilitar a obtenção destes valores foi elaborada uma programação em linguagem C++ no software Microsoft Visual Studio 2017 (Apêndice 5).

TABELA 3. Equações matemáticas dos parâmetros estimados a partir da curva de acúmulo de massa seca no grão.

Parâmetro	Equação
Massa inicial (Minicial)	Massa média da primeira coleta, referente a casca do grão
5% da massa final (5%Mfinal)	$Minicial + (D * 0,05)$
95% da massa final (95%Mfinal)	$Mfinal - (D * 0,05)$
Duração efetiva do acúmulo (DEA)	$Dia(95%Mfinal) - Dia(5%Mfinal)$
Taxa média de acúmulo (TxMÉD)	$(95%Mfinal - 5%Mfinal)/DEA$
Taxa máxima de acúmulo (TxMÁX)	$\left[\frac{dy}{dx} (Mfinal - (D)exp^{-at^b}) \right] = 0$

Foram elaborados gráficos das curvas de enchimento de grãos para cada genótipo e terço da panícula no software SigmaPlot. Os pontos amostrais foram apresentados com o intervalo de confiança, estimado por:

$$IC(1 - \alpha) = \bar{X} \pm t_{\frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{EQUAÇÃO 2})$$

Onde α é o nível de significância, \bar{X} é a média amostral, s é o desvio padrão da amostra e n o número de repetições da amostra.

Para as variáveis explicativas que apresentaram efeito significativo na análise de variância, foi realizado o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro para comparação das médias dos tratamentos. Essas análises, bem como as análises de correlação linear foram realizadas no software SigmaPlot.

3.3 Resultados

Os genótipos apresentaram massa final do grão diferentes possibilitando o estudo do comportamento de enchimento individual para cada genótipo. A cultivar URS Altiva, seguida pela linhagem UFRGS 146155-3 apresentaram as maiores

massas finais do grão, enquanto a cultivar URS F Flete apresentou a menor (Tabela 4).

TABELA 4. Parâmetros de caracterização do comportamento do acúmulo de massa seca no grão de sete genótipos de aveia. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.

Genótipo	Grão ¹	Massa Final		Início (5%) ²		Final (95%) ²		Máximo		DEA ⁴	Taxa média ³
		Dia	Massa	Dia	Massa	Dia	Massa	Dia	Taxa ³		
URS	S1	47	45	11	14	31	43	22	1,98	20	1,41
Altiva	S2	45	26	11	7	30	25	22	1,28	19	0,91
	M1	45	44	15	13	34	42	26	2,20	19	1,51
	M2	45	27	14	7	33	25	26	1,45	19	1,00
	I1	49	41	14	10	35	39	27	1,92	21	1,34
	I2	49	24	14	5	36	23	27	1,21	22	0,83
	URS	S1	43	41	9	14	28	39	20	1,74	19
Corona	S2	38	25	10	9	27	23	20	1,21	17	0,86
	M1	45	40	11	13	31	38	22	1,75	20	1,24
	M2	56	25	11	8	38	24	26	0,82	27	0,59
	I1	48	37	12	10	33	35	24	1,77	21	1,24
	I2	46	24	11	6	31	22	23	1,21	20	0,85
	URS	S1	37	32	13	12	27	31	22	1,80	14
F Flete	S2	32	17	13	6	26	16	21	1,14	13	0,77
	M1	45	31	14	7	31	29	20	1,42	17	1,01
	M2	51	17	15	2	33	16	19	0,74	18	0,53
	I1	41	28	14	8	31	26	25	1,53	17	1,06
	I2	45	15	15	3	34	15	25	0,74	19	0,52
	URS	S1	40	41	10	13	29	39	21	1,90	19
Taura	S2	42	27	10	8	30	25	21	1,20	20	0,86
	M1	45	38	9	11	32	36	21	1,52	23	1,10
	M2	45	25	10	7	33	24	22	1,08	23	0,77
	I1	45	34	12	10	35	33	24	1,46	22	1,04
	I2	45	22	12	11	33	21	25	1,02	21	0,73
	URS	S1	51	38	10	12	33	37	23	1,48	23
137117-2	S2	42	26	13	9	31	24	24	1,24	18	0,86
	M1	51	38	13	12	37	36	27	1,46	24	0,99
	M2	50	25	13	7	36	24	27	1,05	23	0,74
	I1	52	34	15	11	38	32	29	1,38	23	0,96
	I2	54	24	16	6	40	22	30	0,99	24	0,69

¹ Posição do grão na espiguetta e na panícula: S1: grão primário do terço superior; S2: grão secundário do terço superior; M1: grão primário do terço médio; M2: grão secundário do terço médio; I1: grão primário do terço inferior; I2: grão secundário do terço inferior;

² Início e final do acúmulo de massa seca no grão considerados como, respectivamente, 5% e 95% da diferença entre a massa inicial e massa final. Massa seca do grão (mg grão⁻¹). Os valores de dia e massa final foram arredondados.

³ Taxa máxima e taxa média de acúmulo de massa no grão (mg grão⁻¹ dia⁻¹).

⁴ Duração efetiva de acúmulo de massa no grão (dias).

continuação TABELA 4. Parâmetros de caracterização do comportamento do acúmulo de massa seca no grão de sete genótipos de aveia. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.

Genótipo	Grão ₁	Massa Final		Início (5%) ²		Final (95%) ²		Máximo		DEA ⁴	Taxa média ³
		Dia	Massa	Dia	Massa	Dia	Massa	Dia	Taxa ³		
UFRGS	S1	48	43	11	15	33	41	24	1,66	22	1,19
146155-3	S2	47	28	12	8	34	27	25	1,22	22	0,87
	M1	52	44	13	13	36	42	26	1,71	23	1,21
	M2	47	29	14	8	35	28	27	1,38	21	0,96
	I1	50	40	16	12	38	38	23	1,75	22	1,06
	I2	49	26	17	7	37	25	30	1,31	20	0,89
	UFRGS	S1	49	38	10	11	32	36	22	1,62	22
146173-1	S2	43	21	12	6	31	20	24	1,00	19	0,70
	M1	49	38	12	9	37	36	26	1,44	25	1,03
	M2	43	21	14	6	32	20	25	1,13	18	0,77
	I1	43	33	17	9	34	32	28	1,96	17	1,32
	I2	43	18	19	5	35	17	29	1,12	16	0,75

¹ Posição do grão na espiguetta e na panícula: S1: grão primário do terço superior; S2: grão secundário do terço superior; M1: grão primário do terço médio; M2: grão secundário do terço médio; I1: grão primário do terço inferior; I2: grão secundário do terço inferior;

² Início e final do acúmulo de massa seca no grão considerados como, respectivamente, 5% e 95% da diferença entre a massa inicial e massa final. Massa seca do grão (mg grão⁻¹). Os valores de dia e massa final foram arredondados.

³ Taxa máxima e taxa média de acúmulo de massa no grão (mg grão⁻¹ dia⁻¹).

⁴ Duração efetiva de acúmulo de massa no grão (dias).

A maior duração do enchimento de grãos nem sempre resultou em maior massa do grão. O grão primário do terço superior da panícula da cultivar URS Altiva atingiu 45 mg em 47 dias após o florescimento. Enquanto, no intervalo de 51 dias a linhagem UFRGS 137117-2 apresentou apenas 38 mg (Tabela 4). No entanto, avaliar o intervalo de tempo após o florescimento pode gerar viés na análise, uma vez que este pode estar inflado pelas diferentes fases da curva de enchimento do grão. Dessa forma, analisar apenas o intervalo entre 5% e 95% da diferença entre as massas secas inicial e final do grão é uma alternativa para reduzir o erro, aumentando a precisão na determinação do comportamento de acúmulo de massa seca e possibilitando a comparação entre os genótipos (Egli, 2017; Yang *et al.*, 2008).

Quando observado o período de enchimento entre 5% e 95% da massa seca final do grão, verifica-se que os genótipos apresentaram duração de enchimento do

grão entre 13 e 27 dias, considerando os grãos primários e secundários dos três terços da panícula. No entanto, quando observado apenas os grãos primários do terço superior, a duração efetiva de acúmulo de massa variou entre 19 e 23 dias, com exceção de URS F Flete que teve duração de apenas 14 dias (Tabela 4 TABELA). Ainda, a duração efetiva do acúmulo de massa nos grãos secundários do terço inferior da panícula variou entre 17 e 22 dias, com exceção novamente de URS F Flete que apresentou duração de 13 dias. Então, a duração do período de enchimento não é uma característica que apresentou diferenças relevantes entre a maioria dos genótipos e entre os locais de inserção do grão na panícula. Tal fato é evidenciado pela média da duração efetiva do enchimento de grãos ser de 20,29 dias com desvio padrão de 2,88 dias. Ainda, a cultivar URS Altiva apresentou 20 dias de enchimento para os grãos primários do terço superior e finalizou seu ciclo com 45 mg grão⁻¹. Por outro lado, a linhagem UFRGS 137117-2 que apresentou 23 dias de enchimento de grãos (o maior intervalo observado entre os genótipos em estudo), obteve apenas 38 mg grão⁻¹ (Tabela 4).

Uma vez que a duração do enchimento de grãos não parece ser o fator principal na definição da massa do grão (Figura 1), outro parâmetro passa a parecer mais importante. Para atingir maior massa de grãos num mesmo intervalo de tempo, a taxa média de acúmulo de massa seca no grão deve ser maior (Figura 2). A grande maioria dos genótipos apresentou taxa média de acúmulo de massa seca nos grãos primários, independentemente da posição na panícula, superior ou muito próximo de 1 mg grão⁻¹ dia⁻¹ (Tabela 4). No entanto, houve grande disparidade entre as taxas médias de acúmulo de massa nos grãos entre os genótipos.

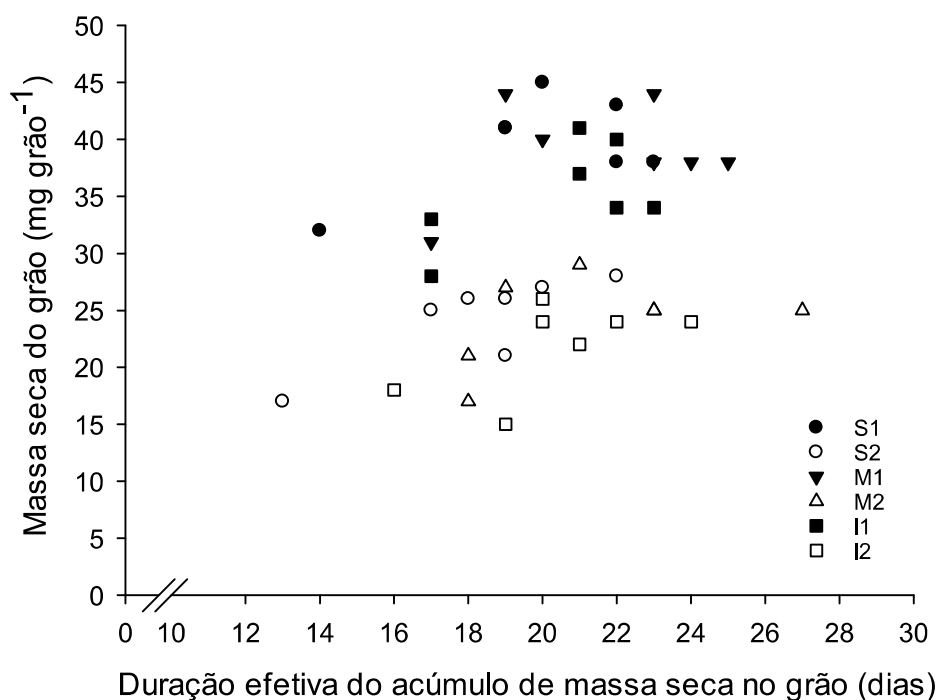


FIGURA 1. Massa seca do grão em relação a duração efetiva do acúmulo de massa seca no grão, de sete genótipos de diferentes posições na panícula e tipos de grãos. S1: grão primário do terço superior; S2: grão secundário do terço superior; M1: grão primário do terço médio; M2: grão secundário do terço médio; I1: grão primário do terço inferior; I2: grão secundário do terço inferior.

A cultivar URS Altiva, que finalizou o ciclo com a maior massa de grão (referente ao grão primário do terço superior), apresentou 20 dias de duração efetiva de acúmulo de massa no grão, com a taxa média de acúmulo de massa no grão de $1,41 \text{ mg grão}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Por outro lado, a linhagem UFRGS 137117-2, teve maior duração (23 dias), mas menor taxa de acúmulo ($1,06 \text{ mg grão}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), resultando num grão de menor massa (Tabela 4). Ainda, a cultivar URS F Flete, apesar de possuir a menor massa de grão, não apresentou a menor taxa média de acúmulo de massa. Sua taxa média de enchimento do grão primário do terço superior é maior do que a apresentada pelas linhagens presentes no experimento (Tabela 4).

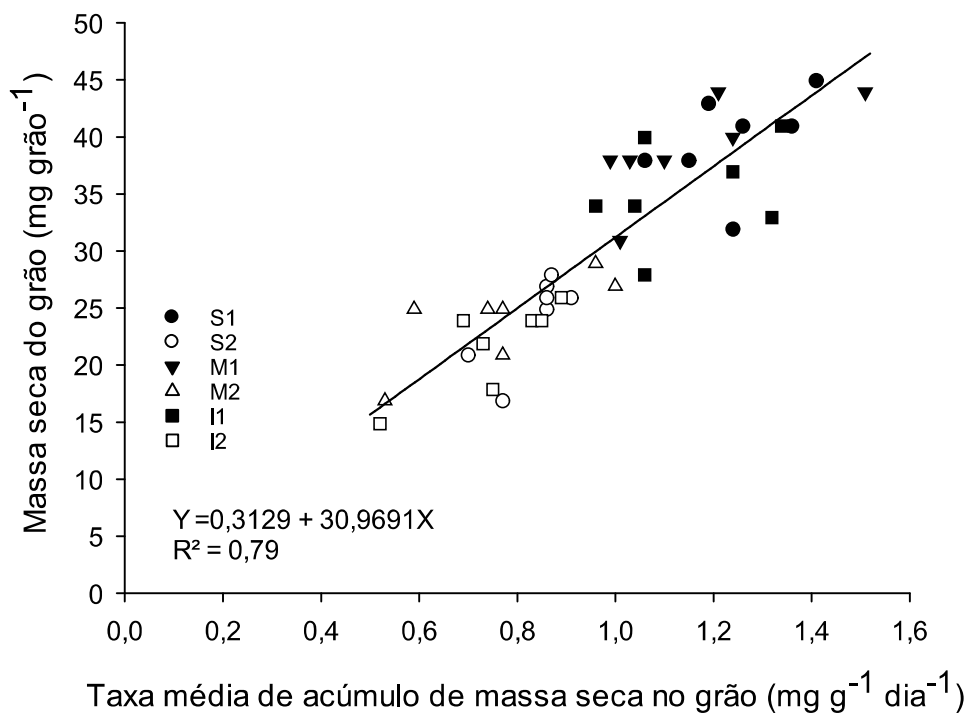


FIGURA 2. Massa seca do grão em relação a taxa média de acúmulo de massa seca no grão, de sete genótipos de diferentes posições na panícula e tipos de grãos. S1: grão primário do terço superior; S2: grão secundário do terço superior; M1: grão primário do terço médio; M2: grão secundário do terço médio; I1: grão primário do terço inferior; I2: grão secundário do terço inferior.

O acúmulo de massa seca do grão segue o comportamento do tipo sigmoide, independentemente da posição do grão na espiguetta e na panícula (Figura 3; Figura 4; Figura 5). No entanto, os grãos primários apresentaram maiores massas que os secundários, assim como os grãos do terço superior apresentam maiores massas que os grãos dos terços inferiores.

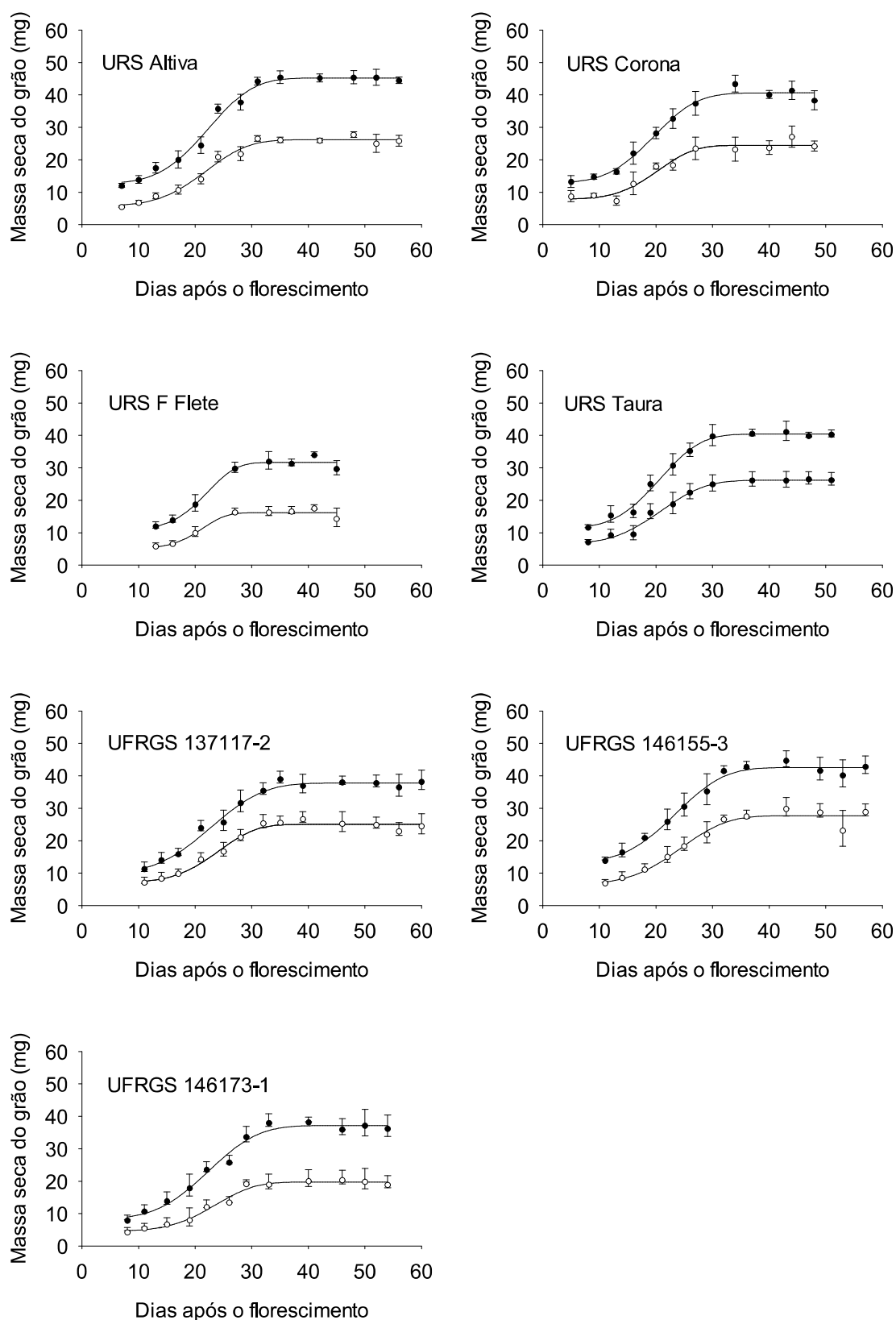


FIGURA 3. Comportamento do acúmulo de massa seca nos grãos primários (círculo preto) e secundários (círculo branco) do terço superior da panícula de sete genótipos de aveia branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.

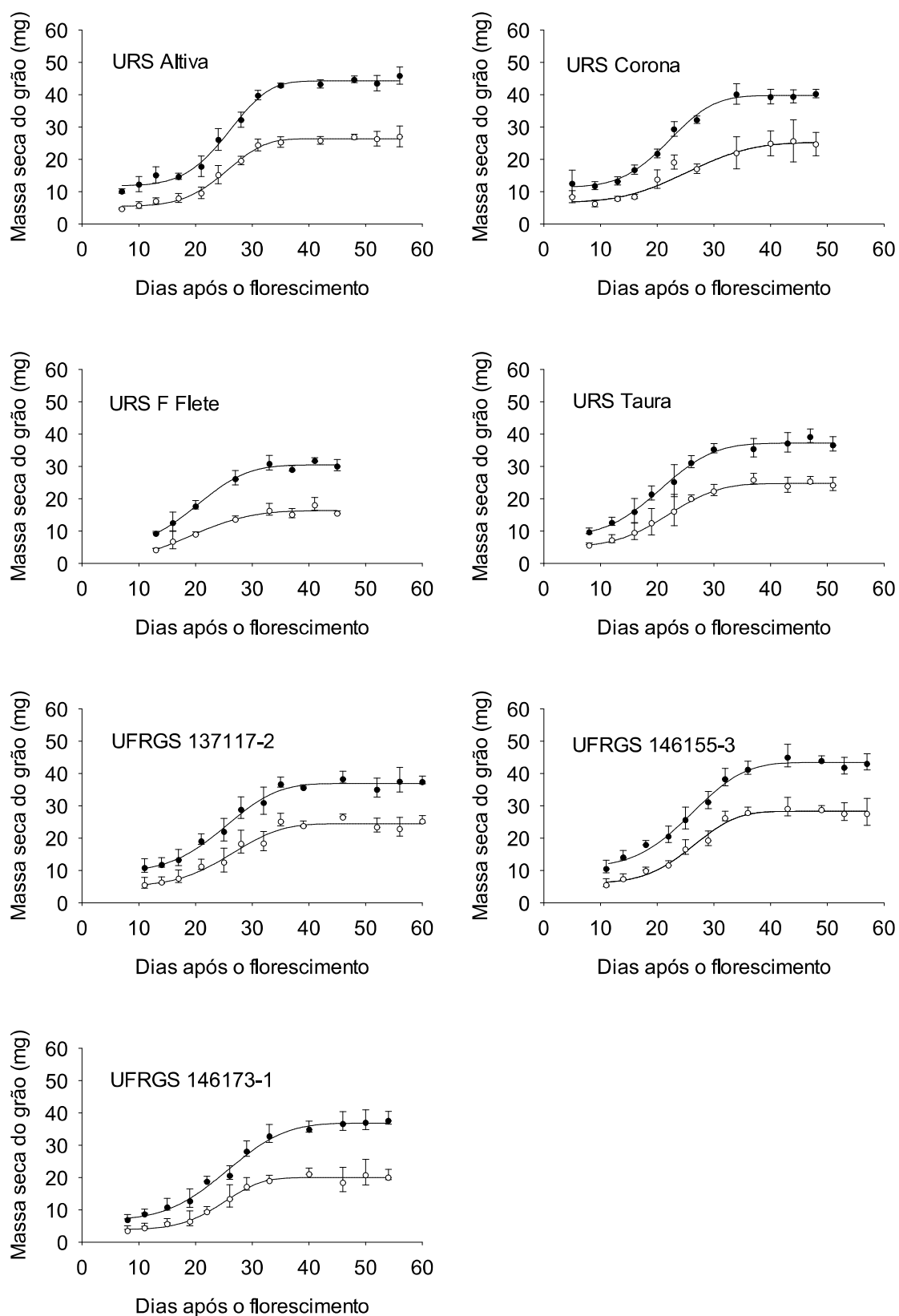


FIGURA 4. Comportamento do acúmulo de massa seca nos grãos primários (círculo preto) e secundários (círculo branco) do terço médio da panícula de sete genótipos de aveia branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.

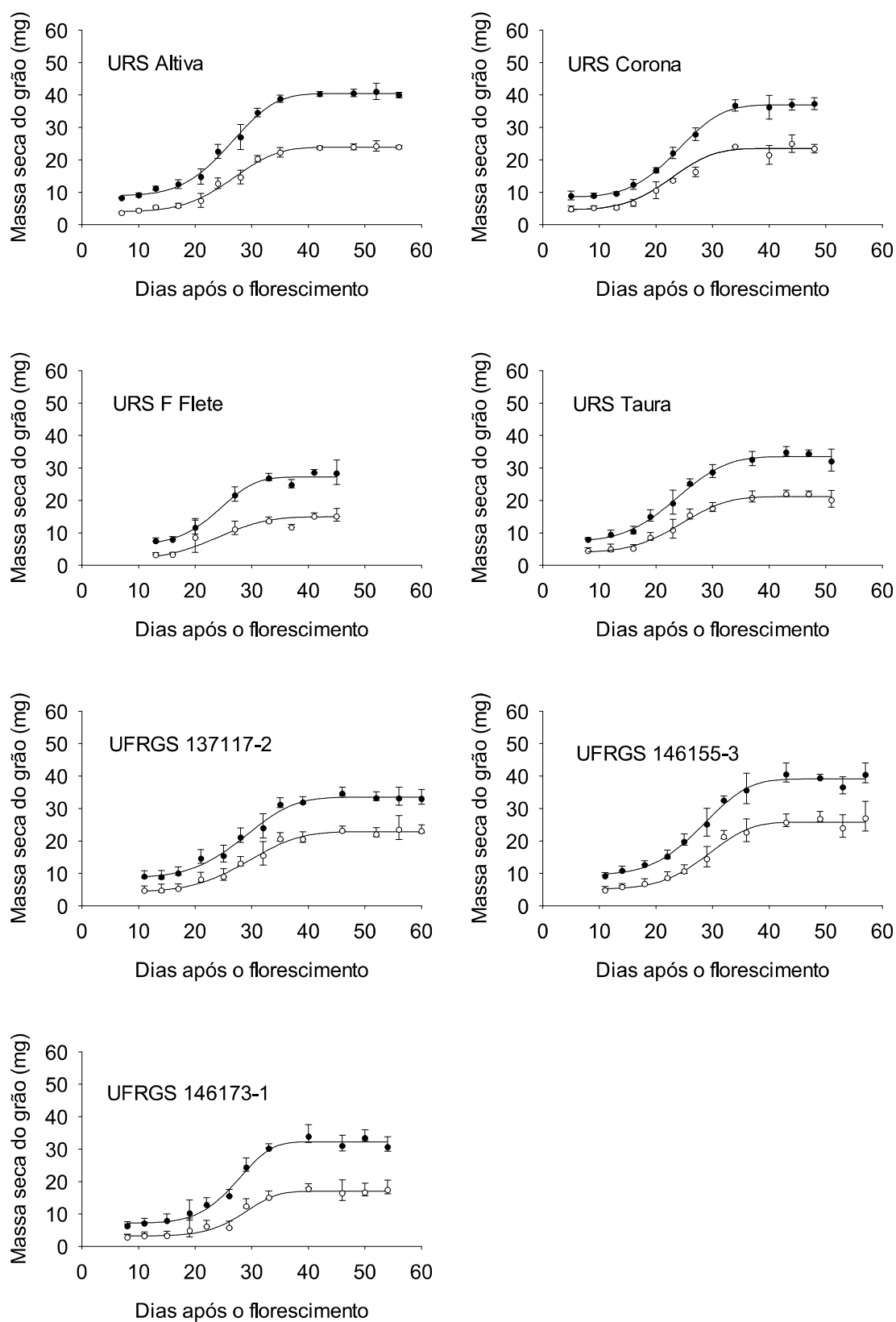


FIGURA 5. Comportamento do acúmulo de massa seca nos grãos primários (círculo preto) e secundários (círculo branco) do terço inferior da panícula de sete genótipos de aveia branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.

Os grãos primários apresentam, em média, 62% maior massa que os grãos secundários. Os genótipos URS F Flete e UFRGS 146173-1 possuem os grãos primários 1,8 vezes maiores que os secundários, enquanto URS Taura e UFRGS 137117-2 1,5 vezes. Portanto, URS Taura, UFRGS 137117-2 e UFRGS 146155-3 apresentaram grãos mais uniformes, com menor diferença de massa entre os tipos de grãos. Essa relação pode ser menor nos grãos posicionados nos terços mais próximos a base da panícula, mas não é uma regra. Ainda, os grãos do terço superior são cerca de 10% mais pesados do que os grãos do terço inferior da panícula.

Apesar da cultivar URS Altiva apresentar os grãos de maiores massas, esse genótipo não apresentou rendimento de grãos estatisticamente diferente da cultivar URS F Flete (Tabela 5). Tal fato sugere que outros componentes do rendimento de grãos possam apresentar maior impacto do que a massa de grãos de forma isolada. URS F Flete apresentou o maior número de grãos por panícula e a menor massa de mil grãos (contabilizando grãos primários, secundários e terciários) e número de panículas por unidade de área, explicando seu baixo rendimento de grãos em relação aos demais genótipos. URS Altiva apresentou grande número de panículas por unidade de área e massa de mil grãos, no entanto baixo número de grãos por panícula. Ainda, URS Taura obteve o maior rendimento de grãos com valores razoáveis em todos os componentes do rendimento estudados.

Existe uma relação entre o número de grãos e a massa destes. Isso é indicado pela correlação linear entre número de grãos por panícula e massa de mil grãos de -0,77. Sendo assim, quanto maior o número de grãos da panícula, independentemente do genótipo, menor será a massa do grão. No entanto, nem sempre o maior número de grãos por panícula resultou em maior rendimento de grãos (Tabela 5).

TABELA 5. Médias dos parâmetros rendimento de grãos (RDM), número de panículas em 0,1m² (NPA), número de grãos por panícula (NGP) e massa de mil grãos (MMG) de sete genótipos de aveia-branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.

Genótipo	RDM¹ kg ha ⁻¹	NPA n ^o	NGP n ^o	MMG g
URS Taura	4183 a ²	39 bc	61 bc	31 ab
UFRGS 146155-3	3995 a	41 ab	55 c	34 ab
UFRGS 137117-2	3885 a	47 a	60 bc	31 ab
URS Corona	3429 ab	35 bc	73 b	32 ab
UFRGS 146173-1	3008 ab	40 ab	55 c	29 b
URS Altiva	2862 ab	40 ab	51 c	34 a
URS F Flete	2558 b	31 c	88 a	24 c
Coefficiente de variação	15,5*	8,6*	8,9*	4,6*

¹ Rendimento de grãos expressos na massa seca.

² Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

* Diferença significativa do fator de variação genótipo pelo teste F a 5% de probabilidade de erro.

Os genótipos URS F Flete e URS Altiva apresentaram, respectivamente, a menor e a maior massa individual do grão primário do terço superior. Por este motivo foram selecionados para determinação da curva de acúmulo de nitrogênio e fósforo no grão (Figura 6; Figura 7). Da mesma forma que para o acúmulo de massa seca no grão, os genótipos apresentaram diferentes comportamentos de acúmulo dos nutrientes (Tabela 6).

Os acúmulos de nitrogênio e fósforo começaram de forma mais tardia no genótipo URS Altiva, mas o fim do acúmulo destes ocorreu em dias após o florescimento muito próximos para os dois genótipos (Tabela 6). Ainda, ocorreu progressão do teor dos nutrientes no grão conforme avançou o estágio de enchimento de grãos (Figura 8). Apesar da progressão do teor de nutrientes ter seguido comportamentos diferentes, são em poucos pontos amostrais que ocorrem diferenças estatísticas entre os dois genótipos. Por conta disto, a diferença de acúmulo de nutrientes observada entre os genótipos é principalmente explicada pelo acúmulo de massa no grão, que alavancou as taxas de acúmulo de nutrientes.

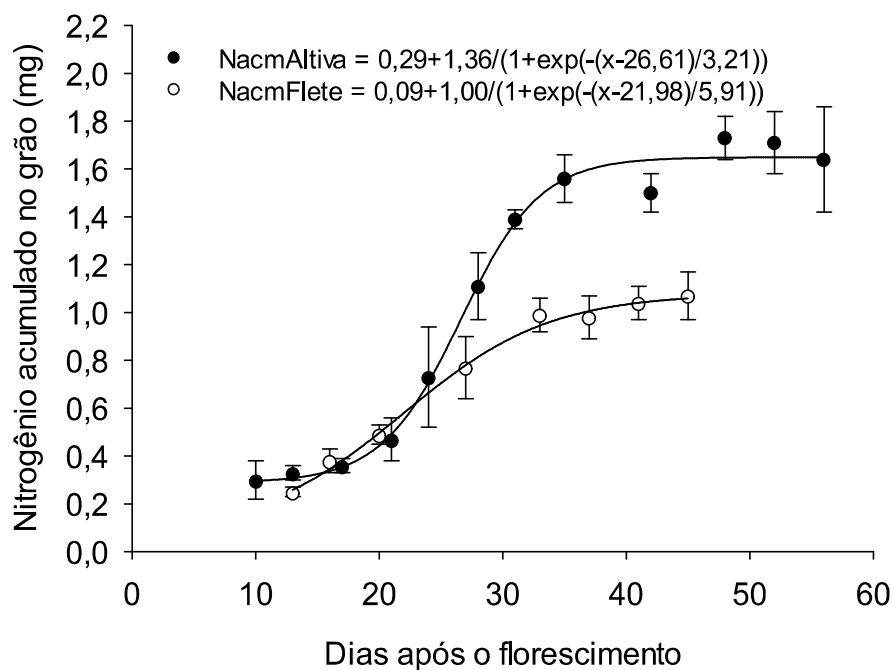


FIGURA 6. Comportamento do acúmulo de nitrogênio nos grãos primários do terço superior da panícula, dos genótipos URS Altiva (círculo preto) e URS F Fleite (círculo branco). Barras representam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.

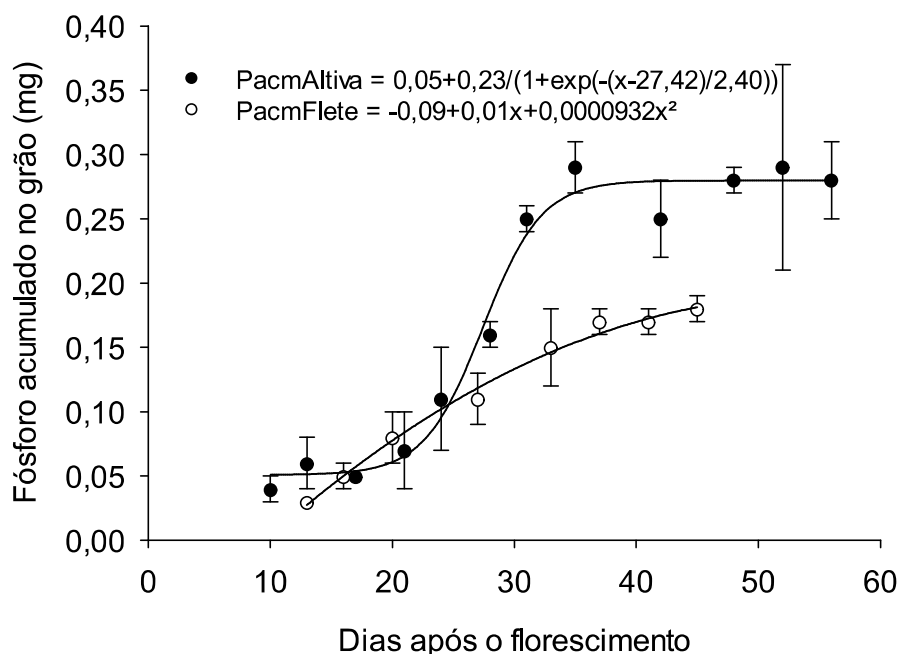


FIGURA 7. Comportamento do acúmulo de fósforo nos grãos primários do terço superior da panícula, dos genótipos URS Altiva (círculo preto) e URS F Fleite (círculo branco). Barras representam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.

O genótipo URS Altiva apresentou taxas de acúmulo de nutrientes muito superiores em relação aos exibidos por URS F Flete, sendo, aproximadamente, 3,3 vezes para nitrogênio e 4,0 para fósforo (Tabela 6). A taxa de acúmulo de massa seca no grão é maior no genótipo URS Altiva, no entanto proporção entre as taxas de acúmulo de massa dos genótipos é menor do que a observada para os nutrientes (Tabela 4; Tabela 6). Isso porque os teores dos nutrientes no grão sofrem incremento com o avanço do desenvolvimento do grão.

TABELA 6. Parâmetros de caracterização do comportamento do acúmulo de nitrogênio e fósforo no grão primário do terço superior, em dois genótipos de aveia com massa individual do grão contrastantes. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.

Genótipo	Nutriente	Início ¹		Final ¹		Taxa máxima		Taxa média ²
		Dia	Acumulado	Dia	Acumulado	Dia	Taxa ²	
URS Altiva	Nitrogênio	19	375	38	1599	25	20,17	12,19
	Fósforo	21	62	37	270	26	4,25	2,54
URS F Flete	Nitrogênio	14	305	39	1029	21	5,39	3,68
	Fósforo	14	39	41	174	19	0,83	0,63

¹ Dia após o florescimento e quantidade acumulada ($\mu\text{g grão}^{-1}$) de nitrogênio e fósforo no início e no fim do acúmulo do nutriente no grão, relativos a 5% e 95% do total acumulado no grão.

² Taxa máxima e média de acúmulo do nutriente no grão ($\mu\text{g grão}^{-1} \text{ dia}^{-1}$).

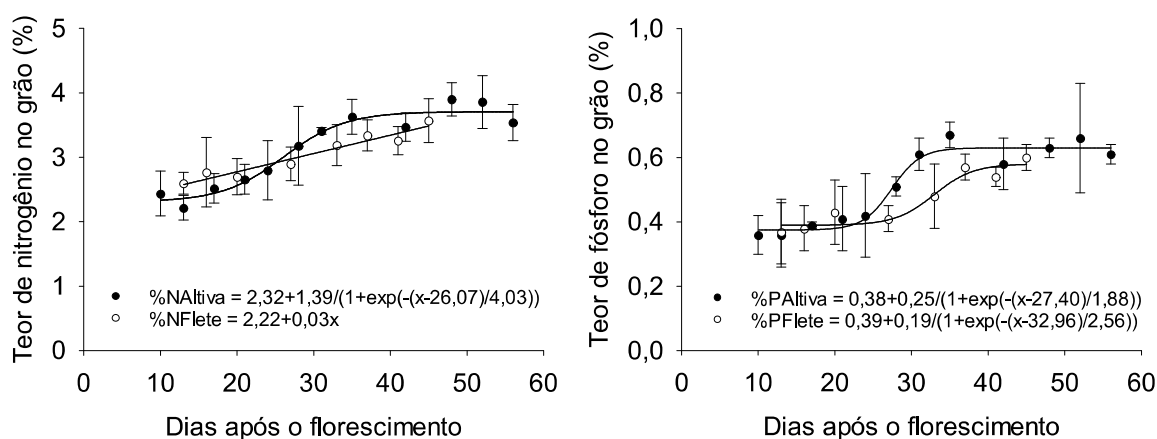


FIGURA 8. Dinâmica dos teores de nitrogênio (esquerda) e fósforo (direita) no grão primário do terço superior da panícula, dos genótipos URS Altiva (círculo preto) e URS F Flete (círculo branco). Barras representam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.

Por intermédio das curvas obtidas para os parâmetros que envolvem o acúmulo de massa e o teor de nutrientes nos grãos, estimou-se os valores referentes a 5% e 95% do acúmulo de massa (Tabela 7). A duração efetiva do acúmulo de URS Altiva foi maior, por este motivo este genótipo atingiu 95% do acúmulo de massa apenas aos 31 dias após o florescimento (43 mg grão^{-1}), enquanto URS F Flete já o obteve aos 27 dias (31 mg grão^{-1}). Salienta-se que o acúmulo de URS Altiva iniciou mais cedo em relação a URS F Flete. Os teores de nitrogênio e fósforo no grão aos 95% do acúmulo de massa foram maiores em URS Altiva, apesar dos valores referentes a 5% serem inferiores a URS F Flete. Por possuir maior massa do grão, bem como maiores teores de nitrogênio e fósforo URS Altiva apresentou maiores valores de nitrogênio e fósforo acumulado no grão.

TABELA 7. Massa seca acumulada no grão, dias após o florescimento, teores de nitrogênio e fósforo no grão e quantidade acumulada no grão de nitrogênio e fósforo no momento de acúmulo de 5% e 95% da massa seca do grão, referentes aos genótipos URS Altiva e URS F Flete. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017.

Parâmetro	Acúmulo de massa	Genótipo	
		URS Altiva	URS F Flete
Massa seca acumulada (mg grão^{-1})	5%	14	12
	95%	43	31
Dias após o florescimento para atingir a massa seca	5%	11	13
	95%	31	27
Teor N (%)	5%	2,35	2,61
	95%	3,39	3,03
Teor de P (%)	5%	0,38	0,39
	95%	0,60	0,41
N acumulado ($\mu\text{g grão}^{-1}$)	5%	300	270
	95%	1374	790
P acumulado ($\mu\text{g grão}^{-1}$)	5%	50	29
	95%	238	121

Na safra 2018 foi realizado um experimento onde a dose de nitrogênio constituía um fator experimental, com o objetivo de verificar seu efeito no

comportamento de acúmulo de massa no grão. Optou-se pelo estudo dos grãos do terço médio do genótipo URS Altiva por esses serem de elevada massa e observar a variação intermediária (terço médio), uma vez que o desenvolvimento da panícula de aveia tem progressão do ápice para a base. Neste contexto, os comportamentos do acúmulo de massa no grão em diferentes doses de nitrogênio são apresentados na FIGURA 9. Independentemente da dose de nitrogênio empregada, os genótipos apresentaram a característica curva do tipo sigmoide durante o acúmulo de massa no grão. No entanto, houveram variações nos seus padrões.

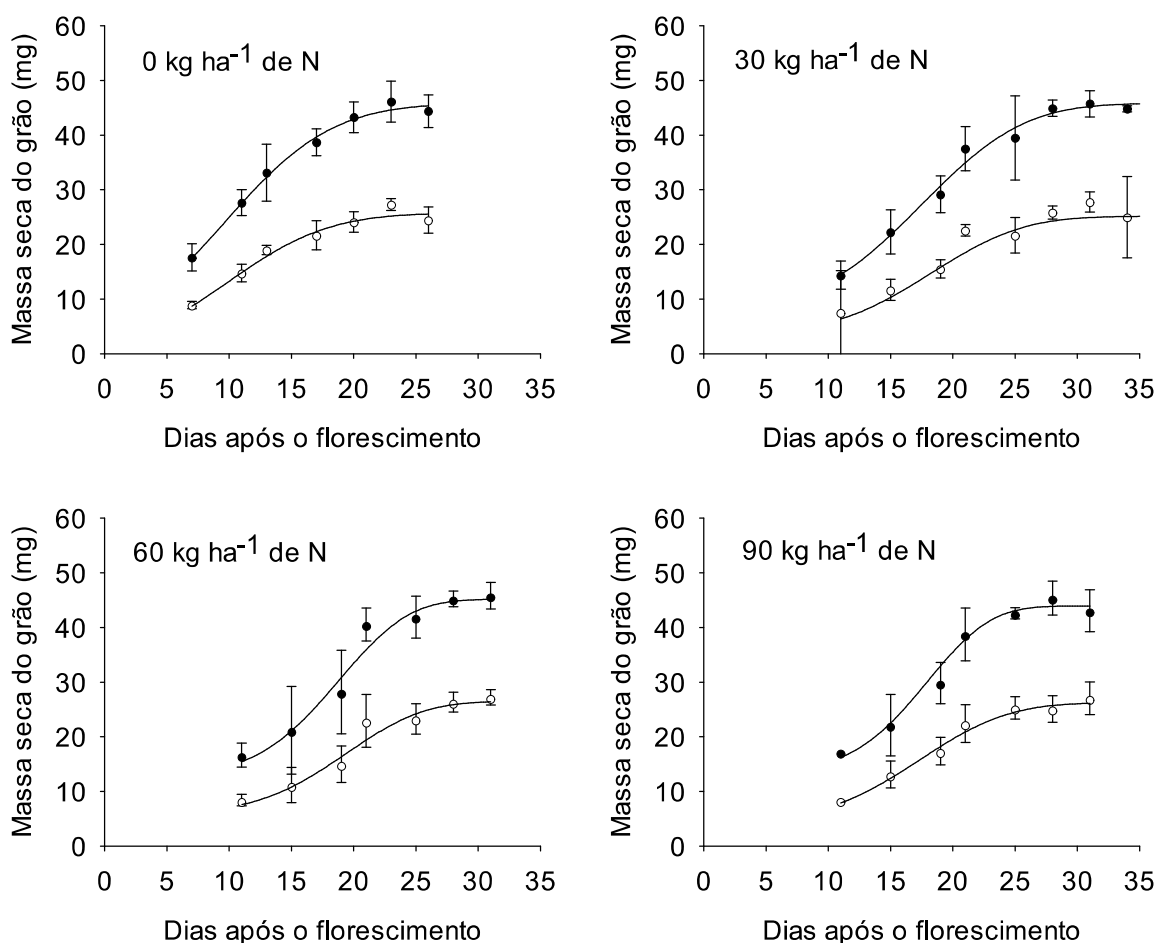


FIGURA 9. Comportamento do acúmulo de massa seca nos grãos primários (círculo preto) e secundários (círculo branco) do terço médio da panícula do genótipo URS Altiva em diferentes doses de nitrogênio. Barras representam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

O acúmulo de massa compreendido entre 5% e 95% da diferença entre as massas iniciais e finais ocorreu entre 12 e 16 dias (Tabela 8). As taxas médias de acúmulo de massa seca no grão aumentaram com o aumento da dose de nitrogênio. No entretanto, não houveram diferenças entre as doses de 0 kg de N ha⁻¹ e 30 kg de N ha⁻¹, bem como entre as doses de 60 kg de N ha⁻¹ e 90 kg de N ha⁻¹. Na dose de 0 kg de N ha⁻¹, a taxa média de acúmulo de massa no grão foi de 1,78 mg grão⁻¹ dia⁻¹ no grão primário e 1,12 mg grão⁻¹ dia⁻¹ no grão secundário, com duração efetiva do acúmulo de massa de 14 e 13 dias, respectivamente. Por outro lado, na dose de 90 kg de N ha⁻¹ a taxa média de acúmulo foi maior no grão primário, atingindo 2,10 mg grão⁻¹ dia⁻¹, com duração efetiva de acúmulo de massa de 12 dias. Como o acúmulo de massa ocorreu em menor espaço de tempo, mesmo com uma maior taxa média de acúmulo, as massas finais dos grãos foram semelhantes.

O rendimento de grãos foi afetado pela dose de nitrogênio, atingindo maiores valores nas maiores doses (Tabela 9). A massa de mil grãos (que inclui todos os tipos de grãos da panícula) foi estatisticamente igual em todos os tratamentos. Portanto, assim como foi observado na massa individual do grão, a dose de nitrogênio não afetou a massa final do grão (Figura 9). No entanto, o número de grãos por panícula apresentou diferença estatística, sendo menor nas menores doses, justificando o menor rendimento. Aliado ao menor número de grãos, a estatura de plantas também indicou a limitação de crescimento imposta pela deficiência em nitrogênio (Tabela 9).

Quando comparado o acúmulo de massa seca no grão na dose de 90 kg de N ha⁻¹, na safra 2018, com o comportamento do genótipo URS Altiva na safra 2017 são observadas algumas diferenças. A duração efetiva do acúmulo de massa no

grão foi menor na safra 2018, mas em compensação a taxa média de acúmulo foi maior, resultando na mesma massa seca final.

TABELA 8. Parâmetros de caracterização do comportamento do acúmulo de massa seca nos grãos do terço médio da panícula do genótipo URS Altiva em diferentes doses de nitrogênio. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

Dose de N ¹	Grão ²	Massa final	DEA ³	Início (5%) ⁴		Final (95%) ⁴		Máximo		Taxa média ⁵
				Dia	Massa	Dia	Massa	Dia	Taxa ⁵	
0	M1	45,86	14	8	19,57	22	44,02	10	2,55	1,78
	M2	25,89	13	8	10,03	21	24,80	10	1,58	1,12
30	M1	45,87	16	12	16,50	28	44,04	18	2,27	1,75
	M2	25,30	15	12	7,63	27	24,24	19	1,42	1,09
60	M1	45,55	13	13	17,49	26	43,96	19	2,65	2,02
	M2	26,90	14	13	9,06	27	25,89	20	1,54	1,17
90	M1	44,33	12	12	18,16	24	42,83	18	2,72	2,10
	M2	26,64	14	12	9,42	26	25,59	18	1,47	1,14

¹ Dose total de adubação nitrogenada (kg de N ha⁻¹).

² M1: grão primário do terço médio da panícula; M2: grão secundário do terço médio da panícula.

³ Duração efetiva de acúmulo de massa no grão (dias).

⁴ Início e final do acúmulo de massa seca no grão considerados como, respectivamente, 5% e 95% da diferença entre a massa inicial e massa final. Massa seca do grão (mg grão⁻¹). Os valores do parâmetro dia foram arredondados.

⁵ Taxa máxima e taxa média de acúmulo de massa no grão (mg grão⁻¹ dia⁻¹).

TABELA 9. Médias dos parâmetros rendimento de grãos (RDM), estatura de plantas (EST), número de grãos por panícula (NGP) e massa de mil grãos (MMG) do genótipo URS Altiva em diferentes doses de nitrogênio. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

Dose de N	RDM ¹ kg ha ⁻¹	EST cm	NGP nº	MMG g
0 kg N ha ⁻¹	2196 c ²	102 c	30 c	34 a
30 kg N ha ⁻¹	2988 b	119 b	41 b	34 a
60 kg N ha ⁻¹	3936 a	132 ab	46 ab	35 a
90 kg N ha ⁻¹	4364 a	137 a	49 a	34 a
Coeficiente de variação (%)	8,43*	6,12*	8,50*	3,32 ^{ns}

¹ Rendimento de grãos expressos em 13% de umidade.

² Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

* Diferença significativa pelo teste F a 5% de probabilidade de erro.

^{ns} Diferença não significativa pelo teste F a 5% de probabilidade de erro.

3.4 Discussão

Os genótipos selecionados para o estudo apresentaram diferenças no padrão de acúmulo de massa seca no grão, bem como dos nutrientes nitrogênio e fósforo. O genótipo URS Altiva apresentou o grão de maior massa, sendo a média do seu grão primário igual a 43,5 mg. No entanto, não obteve rendimento estatisticamente superior ao genótipo URS F Flete, que obteve o grão de menor massa (30,2 mg) e o menor rendimento de grãos. Quando considerado os grãos primários e secundários, o genótipo UFRGS 146155-3 apresentou a maior massa média de grão, seguido de URS Altiva, sendo respectivamente 35,2 mg e 34,6 mg. Tais resultados demonstram que a massa de grãos por si só não é capaz de justificar altos rendimentos de grãos. O número de grãos por unidade de área tem sido destacado como o fator de maior impacto na definição do rendimento de grãos em cereais de inverno (Peltonen-Sainio *et al.*, 2007). No entanto, como observado, o número de grãos por panícula e a massa de grãos não são capazes de justificar o alto rendimento de grãos, o que sugere a necessidade do estudo em conjunto com outros componentes do rendimento.

A duração efetiva do acúmulo de massa seca não apresentou grandes diferenças entre os genótipos, variando entre 20 e 23 dias, exceto para a cultivar URS F Flete que teve duração média de 16 dias. Esse genótipo apresentou também a menor massa final do grão, mostrando que a duração é um fator que interfere na definição da massa seca do grão. No entanto, a pouca variabilidade existente entre os genótipos reduz o impacto desse parâmetro. Por outro lado, na cultura do arroz a variabilidade existente entre os genótipos é grande e a duração do enchimento do grão é considerada responsável pelas diferenças no rendimento de grãos (Yang *et al.*, 2008). O fato do genótipo URS F Flete apresentar essa diferença na duração

do enchimento de grão possivelmente está relacionado com suas características, pois, diferente dos demais, apresenta ciclo longo e tem propósito forrageiro.

Como a duração não apresentou diferenças significativas na definição da massa do grão entre a maioria dos genótipos, o parâmetro taxa de enchimento tornou-se o principal determinante da massa seca do grão. Isso foi evidenciado pelo fato dos genótipos com maiores taxas de acúmulo apresentarem as maiores massas secas finais do grão (Tabela 4). Segundo Gasura *et al.* (2013), esse parâmetro na cultura do milho apresenta alto coeficiente de determinação genética e alta correlação com o rendimento de grãos. O mesmo autor sugere que a taxa de acúmulo de massa seca no grão é interessante estratégia de seleção secundária em programas de melhoramento. No entretanto, no presente estudo não foi encontrada relação entre a taxa média de acúmulo de massa ou a duração efetiva de acúmulo de massa com o rendimento de grãos. Estes parâmetros se relacionam apenas com a massa final do grão. Portanto, a seleção direta da massa seca final do grão apresenta-se com uma estratégia mais simples.

URS Altiva teve maior teor de nitrogênio e fósforo aos 95% de massa acumulada, que junto da maior massa acumulada no grão, apresentou maior quantidade de nitrogênio e fósforo acumulado em relação a URS F Flete (Tabela 7). Salienta-se que a diferença da duração efetiva de acúmulo de massa seca entre os dois genótipos é de 6 dias. Isso faz com que a diferença encontrada na quantidade final de massa seca e nutrientes acumulados ocorra em função tanto da duração efetiva, quanto da taxa média de acúmulo de massa seca no grão. Essas diferenças referentes a nitrogênio e fósforo podem estar relacionadas com as diferenças de massa seca do grão entre os dois genótipos.

Em trigo, a antese precoce aliada a persistência foliar, com rápida senescência, resulta em maiores taxas de acúmulo de massa no grão e,

consequentemente, grãos maiores (Xie *et al.*, 2016b). Isso possivelmente está relacionado ao balanço existente entre fonte e dreno, sendo que uma alta capacidade de dreno requer alta habilidade da fonte em transferência de assimilados para o grão (Okamura *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 1999). Como o nitrogênio atua na capacidade de dreno, genótipos que possuem maior translocação de nitrogênio para o grão, possuem também maiores taxas de acúmulo de massa, por conseguinte, maior massa final do grão (Tegeder & Hammes, 2018; Zhao *et al.*, 2015). No entanto, a maneira que ocorre a translocação deve ser considerada.

A translocação de nitrogênio de forma precoce e rápida apesar de elevar o teor de nitrogênio no grão, reduz a massa do grão. Isso porque nessa situação ocorrerá senescência foliar prematura, reduzindo a capacidade fotossintética da planta e o balanço dreno-fonte (Wei *et al.*, 2018). Contudo, não foram observadas grandes diferenças na evolução dos teores de nitrogênio entre o genótipo de maior e o de menor massa do grão. Mas, ocorreu diferença na evolução do fósforo, onde o genótipo URS Altiva apresentou maiores teores de fósforo entre 25 e 35 dias após o florescimento, coincidindo com o final da duração efetiva do acúmulo de massa grãos (Figura 8; Tabela 4). Possivelmente, o maior teor de fósforo contribuiu na manutenção da taxa de acúmulo de massa, resultando em maior massa seca do grão.

A aplicação foliar de fósforo na pós-antese promove a atividade antioxidante, retardando a senescência foliar que, por consequência, aumenta a duração efetiva do acúmulo de massa no grão (Lv *et al.*, 2017). Como os teores de fósforo no grão em URS Altiva só aumentaram na fase final do acúmulo de massa seca, a translocação do fósforo, de forma mais efetiva, iniciou-se apenas após a taxa máxima de acúmulo de massa no grão, retardando a senescência, de forma a

permitir que as folhas permanecessem por maior período de tempo realizando fotossíntese para suprir a demanda do dreno. Com isto, a disponibilidade de assimilados continuaram sendo, por maior período de tempo, provenientes da translocação de assimilados acumulados na fase vegetativa e dos sintetizados durante o processo de acúmulo de massa.

Os grãos primários apresentaram, em média, 64% maior massa do que os grãos secundários. Ainda, a massa do grão decresceu na direção do ápice para a base da panícula. Tais situações estão de acordo com a preferência de dreno existente na panícula de aveia. Isso porque a posição em que a espiguetas está inserida na panícula determina sua capacidade de dreno, sendo que o desenvolvimento da panícula de aveia ocorre da espiguetas terminal em direção à espiguetas basal (Rajala & Peltonen-Sainio, 2011). Ainda, como as espiguetas de aveia podem possuir mais de um grão, os grãos primários são maiores que os secundários, que são maiores que os terciários, se estes estiverem presentes. Por conta disto, a distribuição do tamanho de grãos em aveia é geralmente representada como uma população multimodal (Doehlert *et al.*, 2002).

Existem diversos fatores que atuam na definição do dreno preferencial, sendo que o balanço entre estes fatores estabelece quais grãos terão preferência no acúmulo de assimilados. A morfologia do floema e do local de descarregamento dos assimilados pode possuir alguns obstáculos que dificultam a translocação de assimilados (Yang *et al.*, 2002). Neste cenário, o grão que apresenta preferência de dreno possivelmente apresenta menor resistência à translocação de assimilados. Em adição, a interconversão de carboidratos é necessária na manutenção do fluxo de assimilados para o interior do dreno. Então, as enzimas invertase, sacarose fosfato sintase e sacarose sintase apresentam papel central (Bihmidine *et al.*, 2013). Ainda, a baixa taxa de divisão celular também pode

diminuir a força de dreno (Li *et al.*, 2013), apresentando-se como uma limitação física ao acúmulo de assimilados.

É possível que a limitação física, relacionada ao número de células do endosperma, seja a principal determinante na diferença observada na massa acumulada entre o grão primário e o secundário. Reforçando estas informações, na cultura do trigo, a diferença de dreno observada entre os grãos tem sido relacionada a diferença no número de células do endosperma e a atividade de enzimas relacionadas à interconversão de carboidratos (Yan *et al.*, 2010).

A massa seca final do grão do genótipo URS Altiva foi semelhante em ambas as safras. Entretanto, houveram diferenças nos parâmetros que compõe o comportamento de acúmulo de massa seca. Na safra 2018, o acúmulo ocorreu em menor intervalo de tempo, numa maior taxa média (Tabela 4; Tabela 8). Durante o período que compreende o acúmulo de massa no grão as condições climáticas foram distintas e possivelmente interferiram no comportamento de acúmulo de massa. A duração efetiva do acúmulo de massa na safra 2017 ocorreu entre 19/09/2017 a 09/10/2017 e em 2018 entre 05/10/2018 a 23/10/2018. A temperatura média do ar foi semelhante em ambos os anos nesse período (19,5°C). No entanto, houveram diferenças entre os anos na precipitação pluvial e na radiação solar neste período. Na safra 2017, a precipitação foi de 58 mm e a radiação solar média 363 W m⁻², enquanto na safra 2018, 6 mm e 418 W m⁻².

A eficiência de produtividade das culturas é definida, em termos termodinâmicos, como a razão da saída e entrada de energia, ou seja, a quantidade de carboidrato produzido por radiação solar disponível (Bonington, 1977). Mas, apesar da radiação solar ser importante, a eficiência da planta em converter a entrada de energia em carboidrato é dependente da precipitação e da temperatura do ar (Holzman *et al.*, 2018). Na safra 2017 o genótipo URS Altiva teve 67 dias de

período vegetativo, enquanto na safra 2018 esse mesmo genótipo teve, na média das doses diferentes doses de nitrogênio, 85 dias de período vegetativo. A menor temperatura e radiação solar durante o período vegetativo podem responder o maior período vegetativo da safra 2018. Por outro lado, a maior radiação solar e disponibilidade de fotoassimilados, promovidos pelo acúmulo durante a fase vegetativa, favoreceram um período reprodutivo mais acelerado. Contudo, como a massa seca do grão aparentemente é um caráter com estabilidade, a taxa média de acúmulo no grão foi maior para manter a mesma massa final.

3.5 Conclusões

Os diferentes tipos de grãos apresentam diferentes massa seca final e comportamentos de acúmulo de massa. Os grãos primários são maiores que os secundários, assim como os grãos do ápice da panícula em relação aos da base. O comportamento de acúmulo de massa segue uma curva do tipo sigmoide, onde o início e o fim apresentam baixas taxas de acúmulo de massa seca.

O parâmetro taxa de acúmulo de massa seca apresenta maior importância da definição da massa final do grão do que a duração do acúmulo. Havendo baixa variabilidade para o segundo caráter entre as cultivares de aveia branca. Por conseguinte, a diferença existente entre os genótipos para os parâmetros de massa seca, nitrogênio e fósforo acumulado são explicados pela taxa de acúmulo. Ainda, a taxa média e a taxa máxima de acúmulo de massa seca no grão estão intimamente relacionadas.

Maiores números de grãos por panícula resultam em menores massas seca de grãos, mesmo que o teor de nitrogênio seja semelhante. No entanto, a translocação de fósforo parece ter impacto na diferença existente entre os genótipos quanto a massa do grão.

A dose de nitrogênio não modifica a massa final do grão. Mas modifica a duração efetiva de acúmulo de massa, reduzindo-a em maiores doses e, conseqüentemente, incrementando a taxa média de acúmulo. Como o rendimento de grãos é reduzido em menores doses de nitrogênio, mas a massa do grão não é modificada, ocorre redução no número de grãos por panícula. Isso possivelmente ocorre de acordo com o equilíbrio entre fonte e dreno.

3.6 Referências bibliográficas

ALMEIDA, M. L. De et al. Tillering does not interfere on white oat grain yield response to plant density. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 2, p. 253–258, 2003.

BIHMIDINE, S. et al. Regulation of assimilate import into sink organs: update on molecular drivers of sink strength. **Frontiers in Plant Science**, Berna, v. 4, n. 6, p. 1–15, 2013.

BONINGTON, S. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical transactions of the royal society B**, London, v. 281, n. 980p. 277–294, 1977.

DOEHLERT, D. C.; MCMULLEN, M. S.; RIVELAND, N. R. Sources of variation in oat kernel size. **Cereal Chemistry**, Saint Paul, v. 79, n. 4, p. 528-534, 2002.

DOLFERUS, R.; JI, X.; RICHARDS, R. A. Abiotic stress and control of grain number in cereals. **Plant Science**, Clare, v. 181, n. 4, p. 331-341, 2011.

EGLI, D. B. **Seed biology and yield of grain crops**. 2nd ed. Wallingford: CABI, 2017. 232 p.

GASURA, E. et al. Exploiting grain-filling rate and effective grain-filling duration to improve grain yield of early-maturing maize. **Crop Science**, Madison, v. 53, n. 6, p. 2295-2303, 2013.

HOLZMAN, M. E. et al. Early assessment of crop yield from remotely sensed water stress and solar radiation data. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 145, p. 297-308, 2018.

IPAGRO. **Observações meteorológicas no estado do Rio Grande do Sul**. 3. ed. Porto Alegre: IPAGRO, 1979. 271 p.

JIANG, Q. et al. Effect of panicle nitrogen on grain filling characteristics of high-yielding rice cultivars. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 74, p. 185-192, 2016.

KENNEDY, S. P. et al. Grain number and grain filling of two-row malting barley in response to variation in post-anthesis radiation: Analysis by grain position on the ear and its implications for yield improvement and quality. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 225, n. 2, p. 74-82, 2018.

KIM, J. et al. Relationship between grain filling duration and leaf senescence of temperate rice under high temperature. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 122, n. 3, p. 207-213, 2011.

LAIDIG, F. et al. Breeding progress, variation, and correlation of grain and quality traits in winter rye hybrid and population varieties and national on-farm progress in Germany over 26 years. **Theoretical and Applied Genetics**, New York v. 130, n. 5, p. 981–998, 2017.

LI, X. T. et al. Critical factors for grain filling of erect panicle type Japonica rice cultivars. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, n. 5, p. 1404-1410, 2013.

LV, X. et al. Effect of phosphorus and potassium foliage application post-anthesis on grain filling and hormonal changes of wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 214, n. 9, p. 83-93, 2017.

MAE, L. et al. Combined drought and heat stress impact during flowering and grain filling in contrasting rice cultivars grown under field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 229, n. 9, p. 66–77, 2018.

MEADE, K. A.; COOPER, M.; BEAVIS, W. D. Modeling biomass accumulation in maize kernels. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 151, p. 92–100, 2013.

MU, X. et al. Dynamic remobilization of leaf nitrogen components in relation to photosynthetic rate during grain filling in maize. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 129, n. 12, p. 27-34, 2018.

OKAMURA, M. et al. Characterization of high-yielding rice cultivars with different grain-filling properties to clarify limiting factors for improving grain yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 219, n. 1, p. 139–147, 2018.

PELTONEN-SAINIO, P. et al. Grain number dominates grain weight in temperate cereal yield determination: Evidence based on 30 years of multi-location trials. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 100, n.2-3, p. 179-188, 2007.

RAJALA, A.; PELTONEN-SAINIO, P. Pollination dynamics, grain weight and grain cell number within the inflorescence and spikelet in oat and wheat. **Agricultural Sciences**, Wuhan, v. 02, n. 3, p. 283–290, 2011.

STRECK, E. V; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. C. D. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222 p.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p.

TEGEDER, M.; HAMMES, U. Z. The way out and in: phloem loading and unloading of amino acids. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 43, p. 16-21, 2018.

THORNLEY, J. H. M.; FRANCE, J. **Mathematical models in agriculture**. 2nd ed. Wallingford: CABI, 2007. 928 p.

WANG, G.; KANG, M. S.; MORENO, O. Genetic analyses of grain-filling rate and duration in maize. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3, p. 211-222, 1999.

WEI, H. et al. Sink-source relationship during rice grain filling is associated with grain nitrogen concentration. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 215, n. 10, p. 23-38, 2018.

XIE, Q.; MAYES, S.; SPARKES, D. L. Preanthesis biomass accumulation of plant and plant organs defines yield components in wheat. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 81, p. 15-26, 2016a.

XIE, Q.; MAYES, S.; SPARKES, D. L. Early anthesis and delayed but fast leaf senescence contribute to individual grain dry matter and water accumulation in wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 187, p. 24–34, 2016b.

YAN, S. et al. Sink strength in relation to growth of superior and inferior grains within a wheat spike. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 148, n. 5, p. 567-578, 2010.

YAN, S. et al. Effects of water and fertilizer management on grain filling characteristics, grain weight and productivity of drip-fertigated winter wheat. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 213, n. 12, p. 983-995, 2019.

YANG, J. et al. Grain and dry matter yields and partitioning of assimilates in Japonica/Indica hybrid rice. **Crop Science**, Madison, p. 766-772, 2002.

YANG, W. et al. Grain filling duration, a crucial determinant of genotypic variation of grain yield in field-grown tropical irrigated rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 105, n. 3, p. 221-227, 2008.

ZHAO, Y. et al. Nitrogen effect on amino acid composition in leaf and grain of japonica rice during grain filling stage. **Journal of Cereal Science**, London, v. 64, p. 29-33, 2015.

4 CAPITULO 2

**Relação de índices de vegetação obtidos por sensores ópticos com
parâmetros morfofisiológicos de *Avena sativa***

4.1 Introdução

A área de cultivo de aveia no mundo é de aproximadamente 9,8 milhões de hectares, sendo que cerca de 64% da produção se concentra na Europa e 25% nas Américas (FAOSTAT, 2017). No Brasil, a área de cultivo tem aumentado. No ano de 1976 foram cultivados 39,8 mil hectares de aveia, com rendimento médio de 0,9 Mg ha⁻¹. Enquanto a área média cultivada entre as safras de 2014 a 2018 foi de 270 mil ha, com rendimento de grãos de 2,1 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2019). Vale ressaltar que os acompanhamentos estatísticos são realizados apenas para a área cultivada de aveia branca destinada à produção de grão. No entanto, estima-se que a área destinada para produção de aveia branca para forragem e cobertura do solo seja de aproximadamente 5 milhões de hectares (Federizzi *et al.*, 2014).

Apesar do expressivo incremento observado ao longo dos anos, o rendimento de grãos está muito aquém do potencial produtivo da cultura. Em condições experimentais, são reportados rendimentos de grãos superiores a 6 Mg ha⁻¹ (REUNIÃO..., 2019). A dificuldade de manejar adequadamente a lavoura é o principal fator determinante da diferença entre o rendimento de grãos alcançado por agricultores e o potencial produtivo da cultura. Essa diferença é denominada lacuna de rendimento (Guilpart *et al.*, 2017). Baixos níveis de adubação e controle de doenças podem reduzir drasticamente o rendimento de grãos e a produção de massa seca de aveia branca (Dietz *et al.*, 2019; Mantai *et al.*, 2015). Ainda, a adubação nitrogenada em momento equivocado pode acarretar em investimentos que não resultam em maior produção de massa seca ou rendimento de grãos (Bredemeier *et al.*, 2013). Logo, ferramentas que auxiliem na tomada de decisão da adubação nitrogenada, que a tornem mais assertiva e efetiva, podem incentivar a realização deste manejo. Dentre estas ferramentas, o uso de modelos de previsão

do potencial produtivo tem apresentado destaque (Bredemeier *et al.*, 2013; Dong *et al.*, 2016; Grohs *et al.*, 2009; Ittersum *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2016).

O potencial produtivo é definido como o rendimento obtido por um genótipo bem adaptado sem condições limitantes referentes a água, nutrientes e estresses (Agustiani *et al.*, 2018; Evans, 1993). A estimativa de potencial produtivo pode ser empregada na identificação de oportunidades para incrementar o rendimento de grãos, bem como elevar a eficiência no uso de insumos (Ittersum *et al.*, 2013). Dessa forma, considerando que a diferença de crescimento entre plantas seja causada por diferença de disponibilidade de nitrogênio, um índice de crescimento pode ser empregado na estimativa do potencial produtivo e, com base nisso, fornecer informações para definição da dose adequada de nitrogênio para cada situação.

Modelos de previsão de potencial produtivo são empregados na agricultura principalmente em situações de grande escala (Ittersum *et al.*, 2013). Esses normalmente consideram condições climáticas, de solo e manejo para simular a influência do genótipo, ambiente e práticas de manejo no crescimento e desenvolvimento de plantas, bem como o rendimento de grãos (Agustiani *et al.*, 2018; Rötter *et al.*, 2015). Índices de vegetação são empregados na agricultura, sendo potenciais alternativas para estimar o potencial produtivo da lavoura de maneira rápida e relativamente barata (Ali *et al.*, 2014; Bredemeier *et al.*, 2013; Shakoor *et al.*, 2017). Os índices vegetativos podem ser obtidos por sensores ópticos proximais e têm-se mostrado promissores tanto para a fenotipagem (Shakoor *et al.*, 2017) quanto para o manejo de plantas (Cao *et al.*, 2015; Erdle *et al.*, 2011). Dentre esses, destacam-se o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), o índice de ocupação de plantas (IOP) e o índice SPAD.

O NDVI surgiu com a proposta de acompanhar a dinâmica vegetativa do planeta Terra, utilizando a reflectância do dossel de plantas na região do vermelho e do infravermelho próximo. A reflectância no infravermelho próximo reflete a quantidade de matéria seca do dossel, enquanto a reflectância na região do vermelho a quantidade de clorofila presente no tecido da planta (Smith *et al.*, 2017; Vian *et al.*, 2018). Posteriormente, outras funções foram atribuídas ao índice, principalmente na agricultura com o uso de sensores ópticos proximais. O NDVI se correlaciona com o índice de área foliar, massa seca da parte aérea e rendimento de grãos, sendo mais sensível quando o dossel de plantas está ainda pouco desenvolvido, uma vez que o índice tende a saturar com o aumento da cobertura do solo (Duan *et al.*, 2017).

O índice SPAD é obtido através do clorofilômetro, que desenvolvido com o objetivo de obter o teor relativo de clorofila a partir da reflectância da região do vermelho e do infravermelho, de modo a relacionar este valor com o estado nutricional da planta (MINOLTA, 1989). Entretanto, diferente do NDVI, o clorofilômetro apresenta a necessidade de contato físico com a folha (Vian, 2015). Dessa forma, apresenta um valor pontual na planta e não do dossel por completo.

Em alternativa ao uso de sensores ópticos comerciais, imagens obtidas por câmeras digitais convencionais tem tomado destaque. Estas imagens apresentam a reflectância do dossel nos comprimentos de ondas vermelho, verde e azul (RGB). Portanto, é possível estimar alguns índices utilizando apenas a região visível do espectro de luz (Fernandez-Gallego *et al.*, 2019; Maimaitijiang *et al.*, 2019). Ainda, a partir destas imagens é possível estimar o IOP, que é a razão de *pixels* da imagem que são ocupados por plantas e os que não são ocupados por plantas (Li *et al.*, 2010).

Apesar dos índices vegetativos apresentarem potencial na agricultura, são escassas as informações a respeito do uso de sensores ópticos proximais na cultura da aveia branca. Diante do exposto, visando reduzir a lacuna de conhecimento pertinente ao uso de sensores ópticos na cultura da aveia branca, o objetivo deste trabalho foi determinar a capacidade de índices obtidos através de sensores ópticos proximais em estimar o rendimento de grãos e a massa seca da parte aérea durante o desenvolvimento da cultura. Caso os índices mostrem-se promissores na estimativa destes parâmetros, estes podem ser utilizados com ferramentas de tomada de decisão para reduzir a lacuna de rendimento.

4.1 Material e métodos

4.1.1 Local de desenvolvimento dos experimentos

Foram conduzidos cinco ensaios experimentais, nas safras 2017 e 2018, na estação experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA-UFRGS), localizada no município de Eldorado do Sul, situada na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul, nas coordenadas geográficas 30°05'22" S e 51°39'08" W. O clima é caracterizado como subtropical de verão úmido quente, do tipo Cfa, conforme a classificação de Koppen (IPAGRO, 1979), com altitude média de 46 metros acima do nível do mar.

Anexo aos experimentos, foi instalada uma estação meteorológica para acompanhamento das condições ambientais durante o período de condução dos experimentos. A precipitação pluvial acumulada e a temperatura média do ar na safra 2017 (09/07/2017 a 09/11/2017) foi, respectivamente, 488 mm e 17,9°C. Enquanto na safra 2018 (19/06/2018 a 22/10/2018), 547 mm e 15,7°C (Apêndice 1).

O solo da área experimental pertence à unidade de mapeamento São Jerônimo, caracterizado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2008). Trata-se de um solo bem drenado, com relevo ondulado e baixa fertilidade natural. No entanto, o experimento foi alocado em área plana e a fertilidade foi corrigida. A análise do solo da área experimental da safra 2018 é apresentada na TABELA 1.

TABELA 1. Análise de solo da área experimental da safra 2018. UFRGS, Faculdade de Agronomia, departamento de solos, laboratório de análises, 2018.

Argila	MO	pH	Índice	P	K	% Sat. da CTC	
	%	H ₂ O	SMP	mg dm ⁻³		Bases	Al
28	2	4,9	5,9	21	185	52	1,9
Al_{troc.}	Ca_{troc.}	Mg_{troc.}	Al+H	CTC	Relações		
		cmol _c dm ⁻³			Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0,1	3,2	1,6	4,9	10,2	2	7	3,4

4.1.2 Caracterização dos experimentos

Foram conduzidos quatro ensaios na safra 2017 e dois ensaios na safra 2018. Um dos ensaios da safra 2018 teve dose de nitrogênio como fator experimental, sendo utilizado para o estabelecimento de modelos matemáticos para estimativa de potencial produtivo. Os demais ensaios foram conduzidos com o objetivo de gerar informações para validação dos modelos matemáticos estimados. Dos cinco ensaios experimentais utilizados para validação dos modelos matemáticos, três foram conduzidos pelo programa de melhoramento genético de aveia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e dois pelo engenheiro agrônomo Fabrício Musa, aluno de mestrado do programa de pós-graduação em fitotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O programa de melhoramento genético de aveia da UFRGS forneceu os dados de rendimentos de grãos referentes ao Ensaio Brasileiro de Cultivares de

Aveia Branca (EBCA), Ensaio Brasileiro de Linhagens de Aveia Branca (EBLA) e Ensaio Regional de Linhagens de Aveia Branca (ERLA). Os três ensaios foram realizados na safra 2017. Os ensaios EBLA e ERLA foram conduzidos com quatro repetições experimentais e EBCA com três, todos sob o delineamento experimental de blocos ao acaso. As unidades experimentais foram compostas por cinco linhas de cinco metros de comprimento, espaçadas a 0,2 metros entre si. A semeadura foi realizada de forma mecanizada, com densidade ajustada para 350 sementes aptas a germinar por metro quadrado. A cultura antecessora ao cultivo foi a soja. A adubação de base foi de 350 kg ha⁻¹ de fertilizante da fórmula 5-30-15 (N-P-K). Na adubação nitrogenada de cobertura foi utilizada ureia, dividindo em duas aplicações de 35 kg de nitrogênio ha⁻¹, quando as plantas se encontravam nos estádios fenológicos de três e seis folhas expandidas. O manejo de controle de doenças não foi realizado, exceto no ensaio EBCA, pois esse ensaio possuía o controle de doenças como um fator experimental.

O engenheiro agrônomo Fabrício Musa disponibilizou os dados de rendimento de grãos e de massa seca da parte aérea dos estádios fenológicos de alongamento de entrenós, florescimento, massa mole do grão e colheita, de dois experimentos, um conduzido na safra 2017 e outro na 2018. Os ensaios foram conduzidos no delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições. As unidades experimentais e os manejos de semeadura e adubação nitrogenada são semelhantes aos utilizados pelos ensaios do programa de melhoramento genético de aveia da UFRGS. O controle de doenças foi realizado sempre que necessário. A área amostral das coletas de massa seca da parte aérea constituiu de duas repetições de 0,1 metros quadrados.

O experimento realizado na safra 2018, com o objetivo de estabelecimento de modelos matemáticos para estimativa do potencial produtivo teve genótipo e

dose de nitrogênio como fatores experimentais. Foram conduzidos cinco genótipos de aveia branca (URS Altiva, URS Corona, URS F Flete, URS Taura e URS 21) e quatro doses de adubação nitrogenada (0, 30, 60 e 90 kg de N ha⁻¹). As doses utilizadas estão de acordo com as normalmente utilizadas em lavouras comerciais e utilizou-se ureia como fonte de nitrogênio. A aplicação de base de nitrogênio ocorreu por ocasião da semeadura, via manual, de acordo com a dose do tratamento. Foram realizadas duas adubações nitrogenadas de cobertura. A primeira quando as plantas se encontravam no estágio fenológico de três folhas completamente expandidas e a segunda com seis folhas completamente expandidas. As três aplicações de nitrogênio foram divididas igualmente, conforme a dose do tratamento (Tabela 2).

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso em arranjo fatorial, com quatro repetições. As unidades experimentais consistiram em cinco linhas de oito metros de comprimento, espaçadas em 0,20 metros entre si. De forma mecanizada, a semeadura foi realizada em 15 de junho de 2018, com densidade ajustada para 350 sementes aptas a germinar por metro quadrado. A adubação de base foi de 400 kg ha⁻¹ de fertilizante da fórmula 0-20-20 (N-P-K). O experimento foi implantado após o cultivo de soja na área experimental. O manejo de doenças foi realizado sempre que necessário.

Nos estádios fenológicos de seis folhas completamente expandidas, alongamento de entrenós, florescimento, massa mole do grão e colheita foram realizadas coletas de massa seca da parte aérea. As amostras constituíram-se de três linhas de 0,60 metros, totalizando 0,36 metros quadrados. As amostras foram secas em estufa com ventilação forçada a 60°C, até obtenção de massa constante e, então, a massa seca foi determinada. O mesmo procedimento de determinação

da massa seca da amostra foi realizado no ensaio experimental do engenheiro agrônomo Fabrício Musa.

TABELA 2. Quantidade total de nitrogênio aplicada no tratamento e quantidades parciais de nitrogênio aplicadas (kg de N ha^{-1}), conforme o momento de aplicação.

Quantidade total de N aplicada	Momento de aplicação da adubação nitrogenada		
	Base	Três folhas	Seis folhas
0	0	0	0
30	10	10	10
60	20	20	20
90	30	30	30

Para a estimativa do rendimento de grãos foram utilizadas apenas as três linhas centrais, excluindo-se a bordadura. Para isto, antes de realizar o procedimento da colheita, as bordaduras foram retiradas da parcela e a área útil de cada parcela foi mensurada. Isto porque os cortes de biomassa, ocasionalmente, tiveram diferentes tamanhos de bordadura (bordadura dentro da parcela, entre um corte e outro), logo resultaram em diferentes comprimentos finais de parcela. O comprimento útil da parcela variou entre 3,7 e 4,9 metros, com área útil média de 2,6 metros quadrados. Os menores comprimentos são referentes as parcelas do genótipo URS F Flete, que apresentou menor população de plantas, por consequência da reduzida germinação de sementes que acarretou em falhas na linha de cultivo. A colheita foi realizada de forma mecanizada. Foi determinada a massa úmida dos grãos, posteriormente foram secos em estufa de ventilação forçada a 60°C e determinou-se a massa seca dos grãos. Então, estimou-se o rendimento de grãos ajustado para 13% de umidade.

4.1.3 Estimativa de índices vegetativos

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) foi estimado pelo sensor óptico ativo Greenseeker. Este sensor utiliza diodos de emissão de radiação nos comprimentos de onda do vermelho (650nm) e do infravermelho próximo (770nm), cuja razão normalizada fornece o valor de NDVI. O sensor foi posicionado sobre a linha central da parcela, aproximadamente, um metro de altura acima do dossel de plantas. A estimativa do índice foi realizada durante todo o ciclo da cultura, incluindo o momento que antecede as coletas de massa seca da parte aérea.

Foram obtidas imagens digitais RGB (vermelho, verde e azul) a partir de câmera fotográfica com resolução de 12 *megapixels*. Essas imagens foram obtidas nos mesmos dias das leituras de reflectância do dossel pelo sensor Greenseeker. A câmera foi posicionada sobre a linha central da parcela na altura de 1,5 metros. As imagens foram editadas, delimitando apenas as três linhas centrais da unidade experimental. O processamento das imagens foi realizado no software SISCOB, que classifica os pixels da imagem conforme rede neural supervisionada (Jorge & Silva, 2009). A rede neural gerada classificou os pixels em duas classes, com e sem presença de aveia branca (Figura 1). Então, a razão entre a quantidade de pixels com aveia branca e sem aveia branca estima o índice de ocupação de plantas (IOP) da imagem.

Foi determinado o teor relativo de clorofila na folha por meio do clorofilômetro Minolta (modelo SPAD-502), que possui como unidade o índice SPAD. Esse clorofilômetro utiliza fontes luminosas e detectores para medir a luz transmitida pela lâmina foliar, nos comprimentos de onda nas regiões do vermelho e do infravermelho. A leitura indica a intensidade da coloração verde da folha, sendo um indicativo da quantidade de clorofila e, portanto, de nutrição da planta (Hawkins *et*

al., 2009). No entanto, diferente do sensor óptico Greenseeker, o clorofilômetro necessita estar em contato com a planta. Por este motivo, a mensuração do índice SPAD foi realizada sempre no meio da última folha completamente expandida de cinco plantas aleatórias na parcela.

Nos ensaios de validação dos modelos matemáticos, foi determinado o NDVI nos estádios fenológicos de seis folhas completamente expandidas, alongamento de entrenós, florescimento e massa mole do grão seguindo o mesmo procedimento empregado no ensaio experimental com variação da dose de nitrogênio.

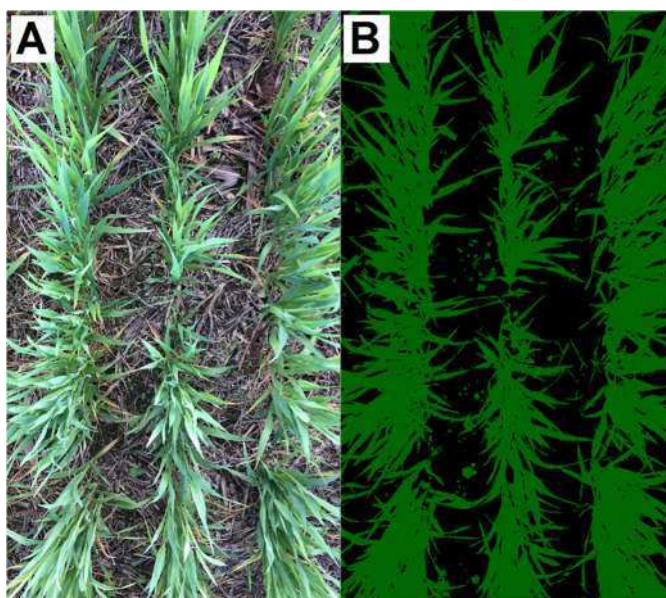


FIGURA 1. Processamento de imagens para obtenção do índice de cobertura do solo (IOP), onde em (A) é apresentada a imagem das três linhas centrais da unidade experimental obtida por câmera RGB e (B) a imagem processada identificando os *pixels* com presença de plantas (verde).

4.1.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, afim de verificar os fatores experimentais que causam variação nas variáveis analisadas. Foi realizada análise de correlação linear de Pearson entre os parâmetros NDVI, IOP e índice SPAD com o rendimento de grãos, bem como para o NDVI e a massa

seca da parte aérea, nos diferentes estádios fenológicos. Posteriormente, foram ajustadas regressões lineares e quadráticas para NDVI e o rendimento de grãos e massa seca, sendo o índice a variável independente do modelo. Deu-se prioridade para o modelo matemático (linear ou quadrático) que apresentasse o maior coeficiente de determinação (R^2) e cujos parâmetros do modelo apresentaram significância estatística. Seguindo o mesmo procedimento, ajustou-se regressões entre as variáveis IOP e rendimento de grãos.

A partir dos modelos matemáticos obtidos, estimou-se o rendimento de grãos e a massa seca da parte aérea dos dois ensaios experimentais do engenheiro agrônomo Fabrício Musa e dos três ensaios do programa de melhoramento genético de aveia da UFRGS. Quando os dados apresentavam homogeneidade de variâncias, a média dos valores de rendimento previstos pelo modelo matemático e o observado nos ensaios foi comparada através do teste t de Student. Caso a homogeneidade de variâncias não fosse obtida, optou-se pelo uso do teste de Welch. Todos os procedimentos foram realizados no software SigmaPlot 14.0.

4.2 Resultados

A variação na dose de nitrogênio foi capaz de gerar variabilidade no rendimento de grãos e na produção de massa seca da parte aérea, evidenciado pela significância dos fatores de variação (Tabela 3). Rendimento de grãos e a massa seca nos estágios fenológicos alongamento de entrenós e massa mole do grão apresentaram efeito significativo da interação entre os fatores de variação genótipo e dose de nitrogênio. O fator dose de nitrogênio causou variação significativa em todos os parâmetros.

TABELA 3. Análise de variância dos parâmetros rendimento de grãos (RDM), massa seca em seis folhas completamente expandidas (MSF), massa seca em alongamento de entrenós (MAE), massa seca no florescimento (MFL) e massa seca na massa mole do grão (MMM) do experimento com variação de dose de nitrogênio. EEA/UFRS, Eldorado do Sul, RS. 2018.

Fator de variação	RDM	MSF	MAE	MFL	MMM
Genótipo	**	**	**	ns	**
Dose	**	*	**	**	**
Genótipo*Dose	*	ns	**	ns	*
Bloco	ns	ns	ns	ns	ns
Coeficiente de variação (%)	12,75	24,95	15,49	15,55	15,33

ns não significativo.

* Significativo pelo teste F a 5% de probabilidade de erro.

** Significativo pelo teste F a 1% de probabilidade de erro.

A análise de correlação sugere linearidade na relação entre os parâmetros rendimento de grãos e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) nos estádios fenológicos de seis folhas completamente expandidas, alongamento de entrenós e florescimento (Tabela 4). No estágio fenológico massa mole do grão as correlações entre os parâmetros foram menores, reduzindo a possibilidade de uso do NDVI para determinação do rendimento de grãos por um modelo linear. Mas pode haver outro tipo de relação entre as variáveis. URS Altiva apresentou valores de correlação altos em todos os estádios (Tabela 4).

Considerando o rendimento de grãos como variável dependente do NDVI, foram elaborados modelos de regressão para cada genótipo presente no experimento (Figura 2). Os genótipos URS Altiva, URS F Flete, URS Taura e URS 21 apresentaram ajuste pelo modelo linear, enquanto URS Corona pelo modelo quadrático. Os coeficientes de determinação dos modelos ajustados variaram entre 0,93 e 0,28, sendo que os maiores coeficientes são observados no estágio fenológico de alongamento de entrenós, seguido do florescimento. O melhor ajuste foi apresentado pelo genótipo URS Altiva, que apresentou pontos bem distribuídos

ao longo da reta e amplitude relativamente grande referente ao NDVI, variando no estágio de alongamento de entrenós entre 0,45 e 0,79 (Figura 2). Enquanto, o genótipo URS F Flete, que possui diferente arquitetura de plantas, no mesmo estágio fenológico, o valor de NDVI variou entre 0,66 e 0,78.

TABELA 4. Correlações entre rendimento de grãos e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento fenológico de diferentes genótipos de aveia. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

Genótipo	Seis folhas expandidas	Alongamento de entrenós	Florescimento	Massa mole do grão
URS Altiva	0,87	0,96	0,95	0,86
URS Corona	0,75	0,88	0,87	0,41 ^{ns}
URS F Flete	0,79	0,88	0,79	-0,79
URS Taura	0,88	0,92	0,89	0,53
URS 21	0,82	0,90	0,83	0,57
Análise conjunta ¹	0,75	0,55	0,47	0,52

^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade de erro.

¹ A análise conjunta foi realizada com todos os genótipos.

Há consistência entre o valor do índice e o rendimento de grãos, onde maiores índices resultaram em maiores rendimentos de grãos. Esse padrão foi observado em todos os genótipos e estágios fenológicos, exceto para o URS F Flete no estágio de massa mole do grão (Figura 2). Para este genótipo, índices NDVI maiores estão associados a menores rendimentos de grão, mostrando que a senescência foliar de URS F Flete ocorre diferentemente dos demais genótipos.

Para validação dos modelos matemáticos elaborados foram realizadas predições de rendimento de grãos em cinco ensaios experimentais. Selecionou-se o estágio de alongamento de entrenós para validação do modelo, pois foi o estágio fenológico que apresentou os maiores coeficientes de determinação dos modelos ajustados. Foram estimados o rendimento de grãos a partir dos modelos e, então,

a média das repetições dos valores preditos e dos valores observados foram comparadas estatisticamente.

Os rendimentos de grãos previstos pelo modelo matemático, utilizando NDVI como variável independente, não diferiram em parte do rendimento de grãos observado (Tabela 5). Nos ensaios B e C, não houveram diferenças estatísticas entre a média de rendimento de grãos prevista e observada para todos os genótipos exceto URS F Flete. O ensaio B ocorreu na mesma safra do ensaio realizado para elaboração do modelo matemático e foi alocado ao lado deste na área experimental. O ensaio A é uma repetição do ensaio B, porém realizado na safra anterior. No ensaio A, não se rejeitou a hipótese de nulidade do teste apenas para o genótipo URS Altiva. Interessantemente, o ensaio C foi realizado na mesma safra do ensaio A.

O modelo matemático em algumas situações mostrou-se capaz de prever o rendimento de grãos de ensaios realizados em duas safras diferentes, mas com controle de doenças. Quando não realizada a aplicação de fungicida, os modelos matemáticos não foram capazes de prever o rendimento de grãos (Tabela 5).

O NDVI também é empregado na estimativa de massa seca da parte aérea em diversas culturas (Erdle *et al.*, 2011; Shakoore *et al.*, 2017). A análise de correlação sugere que o aumento de massa seca reflete em aumento do índice de vegetação (Tabela 6). No estágio de seis folhas completamente expandidas as correlações entre as variáveis são em geral menores, evidenciando que não há relação linear entre as variáveis. Ainda, URS F Flete apresentou correlação linear negativa entre as variáveis no estágio fenológico massa mole do grão, corroborando o ocorrido com a relação entre NDVI e rendimento de grãos (Tabela 4).

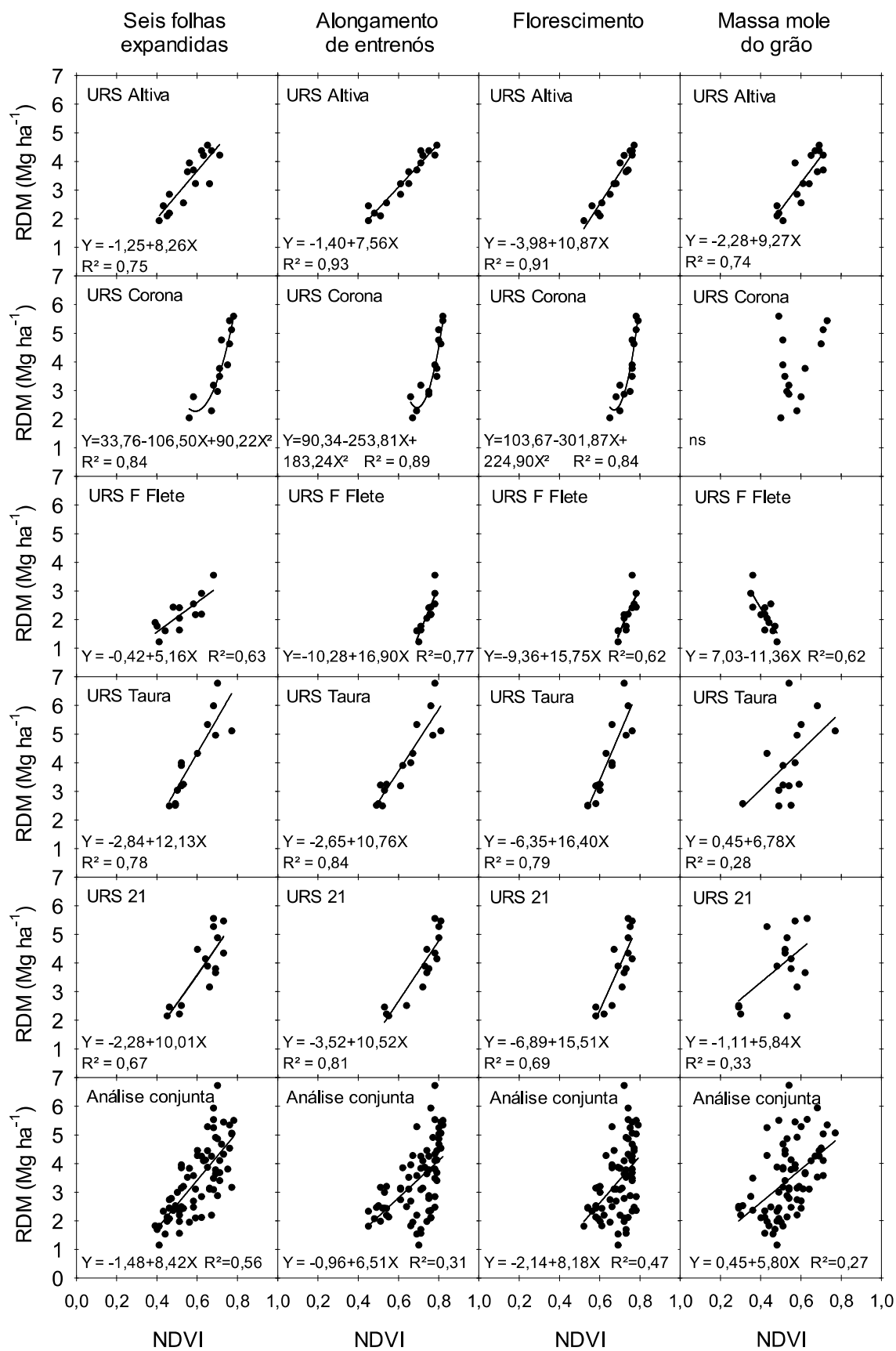


FIGURA 2. Relação entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em quatro estádios fenológicos e o rendimento de grãos, de cinco genótipos de aveia-branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

TABELA 5. Diferenças entre média do rendimento de grãos observado e o rendimento previsto por modelo matemático através do índice de vegetação por diferença normalizada do estágio fenológico de alongamento de entrenós.

Genótipo	Parâmetro ¹	Ensaio com aplicação de fungicidas			Ensaio sem aplicação de fungicidas		
		A ²	B	C	D	E	F
URS	Diferença	937	93	328	1270	748	1190
Altiva	n	3	4	3	3	4	4
	p	0,096	0,715	0,208	0,074	0,022	0,003
URS	Diferença	3512	73	673	-	2815	2717
Corona	n	4	4	3	-	4	4
	p	<,001	0,646	0,475	-	0,007	0,016
URS	Diferença	1399	1205	-	-	-	-
F Flete	n	4	4	-	-	-	-
	p	0,016	<,001	-	-	-	-
URS	Diferença	963	822	854	4205	-	-
Taura	n	4	4	3	3	-	-
	p	0,032	0,064	0,259	<,001	-	-
URS	Diferença	-	84	750	-	2702	2841
21	n	-	4	3	-	4	4
	p	-	0,828	0,204	-	<,001	<,001

¹ Diferença: Diferença entre médias dos valores de rendimento previsto pelo modelo matemático e o observado; n: número de observações; p: probabilidade de erro do teste t de Student. Quando não encontrada homogeneidade de variância, foi aplicado o teste de Welch, cuja probabilidade é apresentada em negrito.

² A: Ensaio experimental do engenheiro agrônomo Fabrício Musa da safra 2017; B: Ensaio experimental do engenheiro agrônomo Fabrício Musa da safra 2018; C: Ensaio brasileiro de cultivares de aveia branca da safra 2017, com aplicação de fungicida; D: Ensaio brasileiro de cultivares de aveia branca da safra 2017, sem aplicação de fungicida; E: Ensaio brasileiro de linhagens de aveia branca da safra 2017; F: Ensaio regional de linhagens de aveia branca da safra 2017; CF: Grupo de ensaios experimentais com aplicação de fungicida; SF: grupo de ensaios experimentais sem aplicação de fungicida.

³ A razão do quadrado médio entre os ensaios é de 1,55 para o grupo com aplicação de fungicida e de 3,916 para o sem aplicação, o que indica a homogeneidade de variâncias.

- Genótipo não utilizado no ensaio experimental ou com apenas uma ou duas repetições úteis.

TABELA 6. Correlações entre massa seca da parte aérea total e índice de vegetação por diferença normalizada em diferentes estádios de desenvolvimento fenológico de diferentes genótipos de aveia. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

Genótipo	Seis folhas expandidas	Alongamento de entrenós	Florescimento	Massa mole do grão
URS Altiva	0,49	0,85	0,77	0,87
URS Corona	0,19 ^{ns}	0,84	0,66	0,18 ^{ns}
URS F Flete	0,71	0,80	0,59	-0,67
URS Taura	0,33 ^{ns}	0,63	0,87	0,63
URS 21	0,63	0,67	0,85	0,74
Análise conjunta ¹	0,39	0,59	0,67	0,58

^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade de erro.

¹ A análise conjunta foi realizada com todos os genótipos.

Foram ajustados modelos de regressão considerando a massa seca total da parte aérea como variável dependente do índice de vegetação por diferença normalizada (Figura 3). Os modelos apresentaram, na maioria, ajuste linear. Entretanto, os coeficientes de determinação foram menores do que os observados nos modelos de predição do rendimento de grão. Os testes de média do valor médio de massa seca da parte aérea observado e previsto pelo modelo matemático são apresentados na TABELA 7. As predições de massa seca mostraram-se inconsistentes nas diferentes safras e estádios fenológicos.

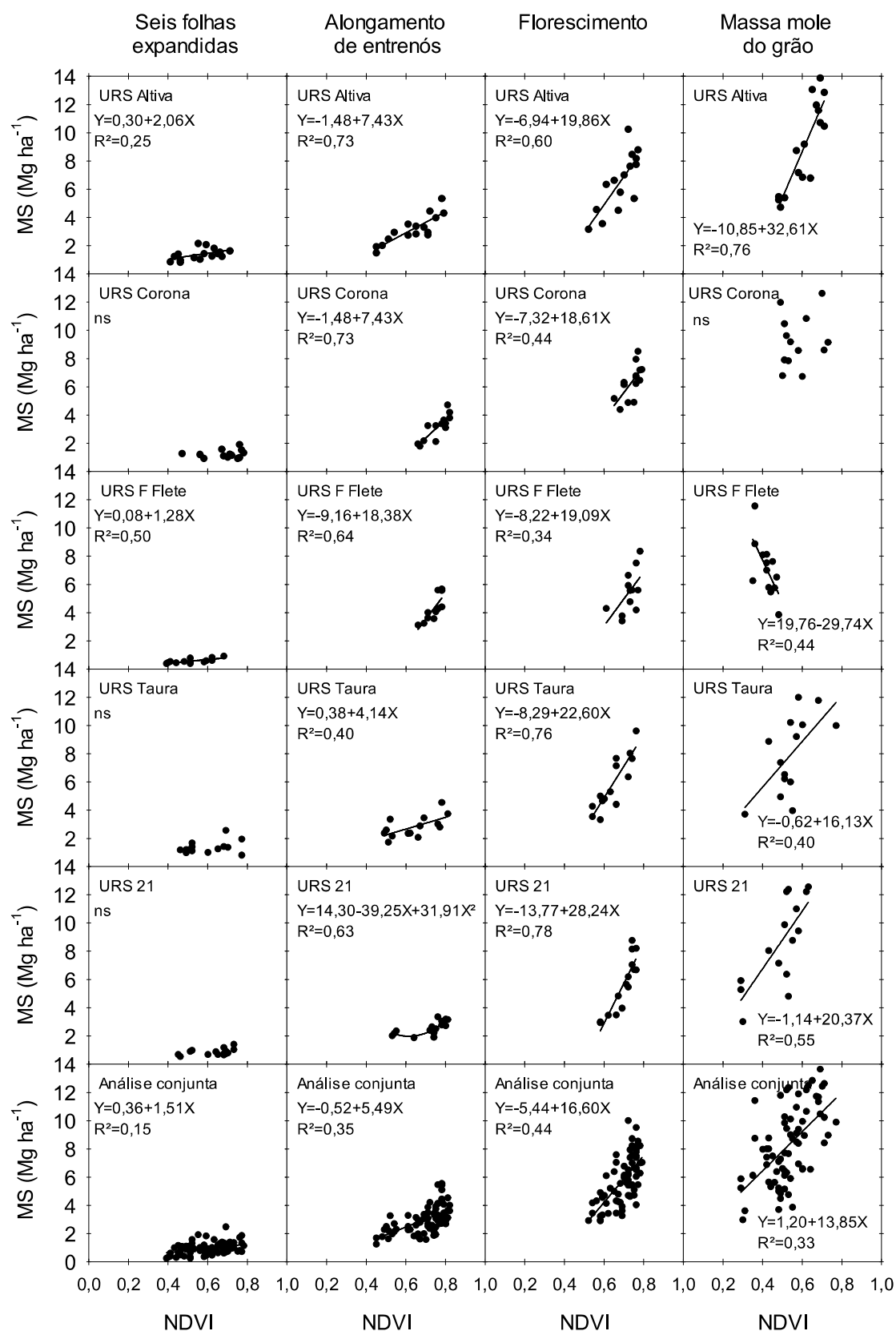


FIGURA 3. Relação entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), em quatro estádios fenológicos e a massa seca da parte aérea, de cinco genótipos de aveia-branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

TABELA 7. Diferenças entre média da massa seca total da parte aérea observada e prevista por modelo matemático através do índice de vegetação por diferença normalizada, nos estádios fenológicos de alongamento de entrenós (AE) e florescimento (FL), nas safras 2017 e 2018.

Genótipo	Parâmetro ¹	Safrá 2017 ²		Safrá 2018 ²	
		AE	FL	AE	FL
URS Altiva	Diferença	1339	1224	671	1347
	n	3	3	4	4
	p	0,007	0,096	0,139	0,057
URS Corona	Diferença	738	1890	579	440
	n	4	4	4	4
	p	0,005	<,001	0,228	0,114
URS F Flete	Diferença	1318	1742	495	1545
	N	4	4	4	4
	P	0,030	0,003	0,161	0,003
URS Taura	Diferença	1253	1102	1081	127
	n	4	4	4	4
	p	<,001	0,003	0,012	0,746
URS21	Diferença	138	30	1161	750
	n	2	2	4	4
	p	0,573	0,782	0,004	0,013

¹ Diferença: Diferença entre médias dos valores de rendimento previsto pelo modelo matemático e o observado; n: número de observações; p: probabilidade de erro do teste t de Student. Quando não encontrada homogeneidade de variância, foi aplicado o teste de Welch, cuja probabilidade é apresentada em negrito.

² Safrá 2017: Ensaio experimental do engenheiro agrônomo Fabrício Musa da safrá 2017; Safrá 2018: Ensaio experimental do engenheiro agrônomo Fabrício Musa da safrá 2018.

A obtenção do NDVI exige a aquisição de equipamentos específicos. Outras alternativas podem ser empregadas em substituição a esta ferramenta, sendo a mensuração do índice de ocupação de plantas (IOP), que pode ser realizada com câmara digital, uma delas (Li *et al.*, 2010). Diante disto, foi verificada a relação entre o NDVI e o IOP, utilizando dados de 634 observações ao longo do desenvolvimento fenológico, ou seja, em diferentes estágios fenológicos (Figura 4). A relação apresentou ajuste linear, sendo o valor do coeficiente de determinação de 0,81. Interessantemente, as correlações lineares sugerem forte relação entre o IOP e o rendimento de grãos, sendo maiores do que as obtidas pelo índice de vegetação

por diferença normalizada (Tabela 8). Os modelos matemáticos elaborados apresentaram coeficiente de determinação variando entre 0,65 e 0,89 (Figura 5). No entanto, apenas o modelo matemático do genótipo URS F Flete estimou um rendimento de grãos que não diferiu estatisticamente do observado no ensaio experimental (Tabela 9). Salienta-se que o teste de validação dos modelos foi realizado apenas com um único ensaio experimental, que não foi realizado na mesma safra do ensaio utilizado para estimação dos modelos matemáticos.

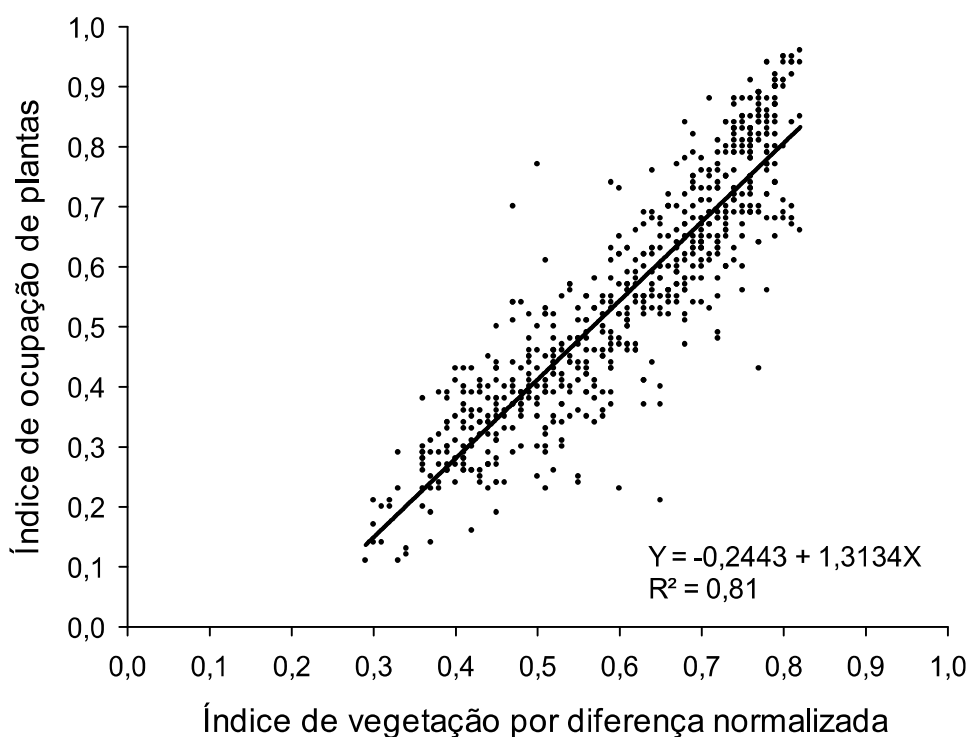


FIGURA 4. Relação entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e índice de ocupação de plantas (IOP) de cinco genótipos de aveia em estimativas realizadas ao longo do desenvolvimento da cultura. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

O teor relativo de clorofila, estimado indiretamente pelo índice SPAD, também é empregado na determinação de nutrição da planta e potencial produtivo em diferentes culturas (Argenta *et al.*, 2003; Kitonyo *et al.*, 2018). As correlações lineares entre o índice SPAD e o rendimento de grãos apresentaram valores

menores do que os obtidos pelos demais sensores ópticos (Tabela 10). Essa informação sugere que os dados não seguem uma distribuição linear. Foram elaborados gráficos de dispersão dos dados e verificou-se que o índice SPAD tem pouca relação com a variável rendimento de grãos de aveia branca (Figura 6).

TABELA 8. Correlações entre rendimento de grãos e índice de ocupação de plantas nos estádios fenológicos seis folhas completamente expandidas e alongamento de entrenós, de cinco genótipos de aveia branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

Genótipo	Seis folhas expandidas	Alongamento de entrenós
URS Altiva	0,94	0,90
URS Corona	0,92	0,56
URS F Flete	0,82	0,80
URS Taura	0,94	0,90
URS 21	0,92	0,88
Análise conjunta ¹	0,78	0,41

¹ A análise conjunta foi realiza com todos os genótipos.

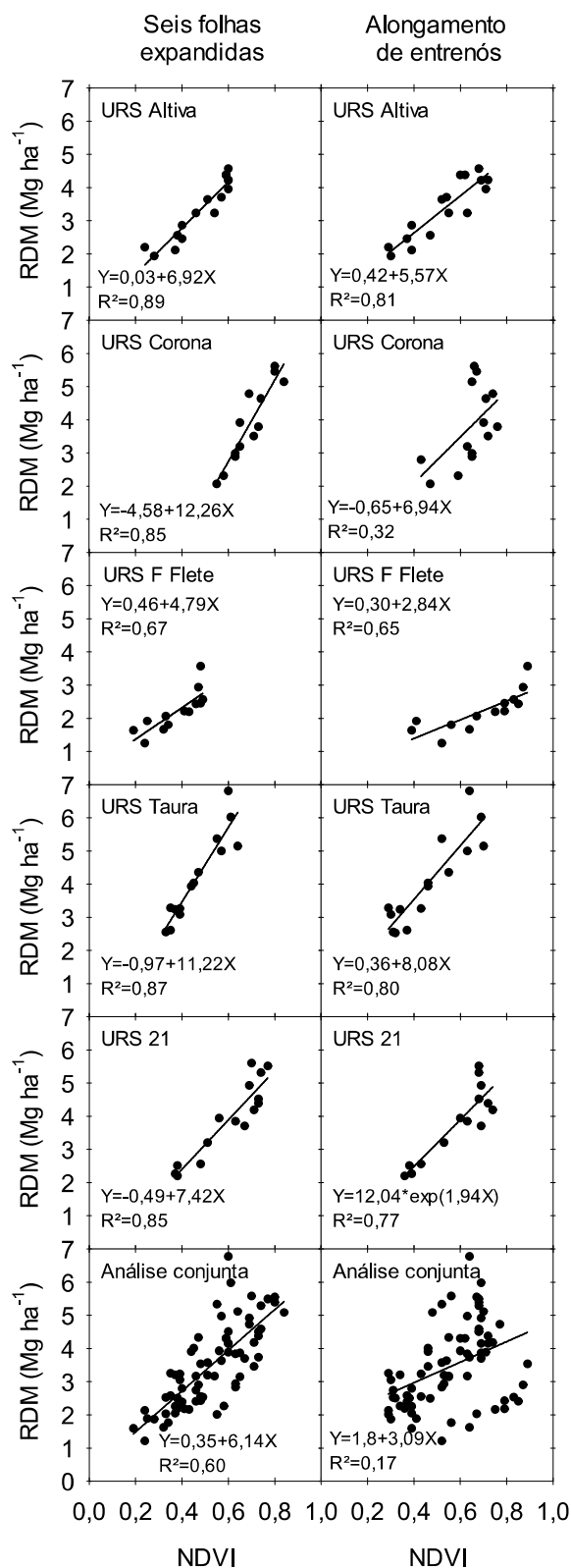


FIGURA 5. Relação entre o índice de ocupação de plantas (IOP), nos estádios fenológicos de seis folhas completamente expandidas e alongamento de entrenós e rendimento de grãos, de cinco genótipos de aveia-branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

TABELA 9. Diferenças entre média do rendimento de grãos observado e rendimento de grãos previsto por modelo matemático através do índice de ocupação de plantas (IOP), no estágio fenológico de alongamento de entrenós.

Genótipo	Parâmetro ¹	Alongamento de entrenós ²
URS Altiva	Diferença	1374
	n	3
	p	0,013
URS Corona	Diferença	1711
	n	4
	p	<,001
URS F Flete	Diferença	104
	n	4
	p	0,724
URS Taura	Diferença	1948
	n	4
	p	0,002

¹ Diferença: Diferença entre médias dos valores de rendimento previsto pelo modelo matemático e o observado; n: número de observações; p: probabilidade de erro do teste t de Student. Quando não encontrada homogeneidade de variância, foi aplicado o teste de Welch, cuja probabilidade é apresentada em negrito.

² Ensaio experimental do engenheiro agrônomo Fabrício Musa da safra 2017.

TABELA 10. Correlações entre rendimento de grãos e índice SPAD nos estádios fenológicos seis folhas completamente expandidas, alongamento de entrenós e florescimento, de cinco genótipos de aveia branca. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

Genótipo	Seis folhas expandidas	Alongamento de entrenós	Florescimento
URS Altiva	0,60	0,45 ^{ns}	0,69
URS Corona	0,75	0,87	0,61
URS F Flete	0,65	0,19 ^{ns}	0,38 ^{ns}
URS Taura	0,83	0,17 ^{ns}	0,71
URS 21	0,83	0,46 ^{ns}	0,36 ^{ns}
Geral	0,26	0,14 ^{ns}	0,35

^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade de erro.

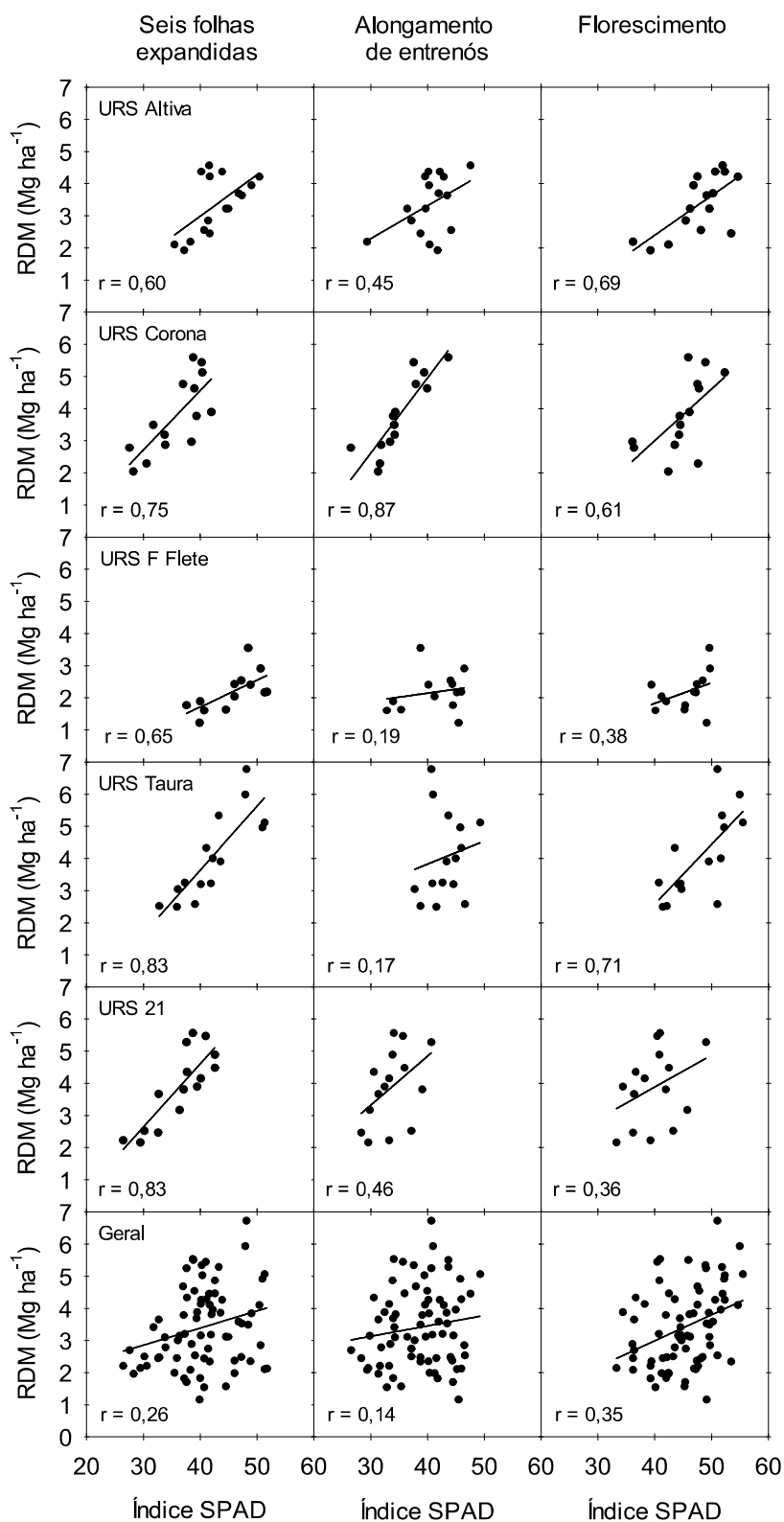


FIGURA 6. Gráficos de dispersão entre as variáveis rendimento de grãos (RDM) e índice SPAD de quatro estágios fenológicos (coluna) e cinco genótipos de aveia branca (linha). Os gráficos com denominação geral apresentam a distribuição agrupada dos cinco genótipos. O coeficiente de correlação linear é representado pela variável r .

4.1 Discussão

A aplicação de diferentes doses de nitrogênio foi eficiente em criar variabilidade na produção de massa seca e no rendimento de grãos (Tabela 3), que conseqüentemente gerou variação nos índices avaliados. O NDVI foi capaz de perceber o aumento de biomassa causado pelo incremento na dose nitrogenada (Figura 3). Esse índice utiliza os valores de reflectância do dossel de plantas nos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo (Duan *et al.*, 2017). A reflectância no comprimento de onda do vermelho representa a quantidade de clorofila no tecido vegetal, enquanto o infravermelho próximo a quantidade de massa seca (Campbell *et al.*, 2008; Moreira, 2011). Dessa forma, quanto maior o acúmulo de tecido fotossinteticamente ativo, maior a reflectância no infravermelho próximo e menor a reflectância na região do vermelho, resultando no aumento do NDVI (Smith *et al.*, 2017; Vian *et al.*, 2018). No entanto, apesar do NDVI ser capaz de perceber a variação na massa seca produzida, o modelo matemático estimado não foi capaz de prever a massa seca de outros ensaios experimentais (Tabela 7; Figura 3).

A massa seca estimada por modelo matemático não apresentou diferença estatística para alguns genótipos no estágio fenológico alongamento de entrenós (Tabela 7). Entretanto, o ensaio experimental em que isto ocorreu foi conduzido na mesma safra e posicionado ao lado do experimento realizado para estimativa do modelo matemático. Quando o modelo foi utilizado para predição de massa seca de um experimento conduzido em outra safra, esse foi ineficaz. Isso também ocorreu no estágio de florescimento, na mesma safra. Esse experimento, apesar de ter sido conduzido na mesma safra, foi semeado uma semana após o experimento realizado para estimativa do modelo matemático. Essas informações sugerem que as diferenças ambientais, causadas pelas diferentes datas de

semeadura e safra, podem resultar em diferenças morfológicas e de concentração de pigmentos fotossintéticos que confundem a estimativa.

Os dois ensaios experimentais utilizados na validação do modelo matemático apresentaram, no estágio de alongamento de entrenós, maiores massas secas acumuladas do que o ensaio utilizado para estimativa dos modelos matemáticos (dados não apresentados). As massas secas do ensaio realizado na safra 2017 foram superestimadas pelos modelos matemáticos, exceto para o genótipo URS Taura. Por outro lado, as massas secas do ensaio da safra 2018 foram subestimadas, exceto para URS Altiva. Neste mesmo estágio fenológico, o NDVI médio dos genótipos pouco diferiu entre o ensaio utilizado para estimativa dos modelos matemático e o de validação da safra 2018, sendo a única diferença encontrada para o genótipo URS Altiva em 0,06 pontos de NDVI. Enquanto o NDVI do ensaio de validação da safra 2017 foi ligeiramente superior (média da diferença de 0,03 pontos de NDVI, variando de 0,00 a 0,09). Dessa forma, com um mesmo NDVI o ensaio de validação da safra 2018 apresentou maior massa seca do que o ensaio de estimativa do modelo matemático, enquanto o ensaio de validação da safra 2017 um menor. Há alguns fatores que podem ter ocasionado isso, dentre eles diferenças e erros de coleta e condições ambientais diferentes que resultaram em diferenças morfológicas.

Plantas com menor perfilhamento e folhas mais eretas apresentam menor NDVI, enquanto aquelas com maior perfilhamento e folhas mais decumbentes exibem maior cobertura do solo e maior NDVI (Vian *et al.*, 2018). Apesar disto, ambas podem possuir a mesma massa seca acumulada. Temperatura e radiação solar podem interferir na morfologia foliar, no comprimento dos entrenós, no número de folhas, na massa seca acumulada e desenvolvimento fenológico (Mizutani & Kanaoka, 2017; Zhang *et al.*, 2019). A temperatura e radiação solar foram

diferentes entre as safras 2017 e 2018 (Apêndice 1). A maior temperatura e radiação solar no início da safra 2017 acelerou o desenvolvimento fenológico da planta. Com isto, o período entre a emergência até o alongamento de entrenós foi, na média dos genótipos, de 52 dias, enquanto os experimentos da safra 2018 o período foi de 69 dias. Em ambas as situações a massa seca acumulada foi maior do que no ensaio utilizado para estimativa do modelo matemático e o ensaio experimental de validação da safra 2018 foi o que apresentou maiores massas secas no estágio de alongamento de entrenós. Mas, ensaio experimental de validação da safra 2017 apresentou os maiores valores de NDVI. Logo, possivelmente, alguma modificação na morfologia das plantas pode ter interferido no valor de NDVI percebido pelo sensor óptico. Uma das prováveis explicações pode ser referente ao teor de clorofila das folhas, uma vez que o índice SPAD foi, em média, maior na safra 2017.

A área amostral do ensaio que realizado para estimativa dos modelos matemáticos foi maior do que a área amostral dos ensaios de validação, sendo, respectivamente, de 0,36m² e 0,10m². Como em ambas as safras a massa seca estimada por esta área amostral foi maior nos ensaios de validação, do que no de estimativa do modelo matemático, é possível que a área amostral tenha sido pequena, reduzindo a precisão da estimativa e superestimando o real valor de massa seca acumulada para o estágio fenológico (Cargnelutti Filho *et al.*, 2015).

O aumento da dose de nitrogênio possibilitou o maior acúmulo de massa seca e maior rendimento de grãos. Para um mesmo genótipo, maiores massas secas acumuladas, resultam em maiores rendimento de grãos (Xie *et al.*, 2016a). Então, como maiores massas secas elevam o NDVI, por conta da maior reflectância no infravermelho próximo (Campbell *et al.*, 2008; Moreira, 2011), uma relação próxima da linearidade já era esperada entre as variáveis rendimento de grãos e

NDVI, principalmente nos estágios iniciais do desenvolvimento fenológico (Tabela 4). A eficiência do NDVI em acompanhar o aumento do rendimento de grãos é evidenciado pelos elevados coeficientes de determinação observados, chegando a 0,93 par ao genótipo URS Altiva no estágio de alongamento de entrenós (Figura 2). No entanto, quando o modelo matemático estimado é extrapolado para outros experimentos, esse não se mostrou preciso na estimativa no rendimento de grãos, principalmente em condições de cultivo diferentes (Tabela 5).

Os modelos matemáticos dos genótipos URS Altiva, URS Corona e URS 21 mostraram-se capazes em estimar o rendimento de grãos do experimento que foi realizado na mesma safra, sob as mesmas condições de cultivo (Tabela 5). No entanto, quando os modelos matemáticos foram empregados na estimativa do rendimento de grãos de ensaios experimentais com condições de cultivo diferentes, isto é, safra e controle de doenças, esses não se mostraram eficientes. Houveram casos de não rejeição da hipótese de nulidade nos ensaios experimentais conduzidos na safra 2017. No entanto, a diferença existente entre o rendimento de grãos observado e previsto por modelo matemático é grande e como o número de repetições é relativamente baixo, há a possibilidade desta diferença não se dever ao simples acaso, figurando o erro do tipo II (Gomes, 2009). Tais informações demonstram que os modelos matemáticos só são capazes de prever o rendimento de grãos de forma eficiente em condições semelhantes às de sua elaboração.

O rendimento de grãos é uma característica complexa, refletindo a interação do ambiente com todos os processos de crescimento e desenvolvimento que ocorrem ao longo do ciclo da cultura (Shi *et al.*, 2009). A massa seca produzida e o teor de clorofila da planta, que são percebidos pelo NDVI, são apenas dois dos diversos fatores que estão relacionados com a definição do rendimento de grãos.

Portanto, é esperado que o modelo não seja capaz de estimar o rendimento de grãos de experimentos realizados em condições diferentes das quais este foi estimado. O não controle de doenças, por exemplo, reduz drasticamente o rendimento de grãos de aveia branca por prejudicar acúmulo de massa no grão através da limitação da área fotossinteticamente ativa, acelerando a senescência foliar (Dietz *et al.*, 2019). No entanto, o valor de NDVI no alongamento de entrenós foi alto, pois a infestação de doenças era ainda reduzida, logo ocorreu uma superestimação do rendimento de grãos real (Tabela 5).

Um modelo mais completo tem maiores chances de contornar os problemas de variabilidade e prever o rendimento de grãos com maior acurácia. Para tanto, o uso de dados de mais de uma safra e ambiente devem ser preconizados. Ainda, seria interessante elaborar modelos matemáticos mais gerais, que pudessem ser utilizados para vários genótipos (Grohs *et al.*, 2009). No entanto, como houve efeito significativo da interação entre os fatores de variação genótipo e dose de nitrogênio para os parâmetros NDVI e rendimento de grãos, nos diferentes estádios fenológicos, os genótipos apresentam características diferentes quanto ao acúmulo de massa seca e partição desta para os grãos. Portanto, o uso de um modelo mais generalista é dificultado, reduzindo as possibilidades de uso do NDVI para previsão do rendimento de grãos num programa de melhoramento de aveia.

Os valores de NDVI no estágio de florescimento foram ligeiramente inferiores aos observados no alongamento de entrenós, mesmo apresentando maior massa seca acumulada (Figura 3). Isso se deve a coloração da panícula, uma vez que essa apresenta menor teor de clorofila, portanto reflete menos na região do vermelho que, conseqüentemente, reduz o valor de NDVI (Campbell *et al.*, 2008; Moreira, 2011). O mesmo ocorre nos estágios fenológicos relacionados com a senescência da planta, onde há redução dos teores de clorofila por consequência

da translocação de assimilados para o grão (Kitonyo *et al.*, 2018). Por conta disto, o uso de NDVI para estimativa de rendimento de grãos deve ser atrelado a um estágio fenológico.

As correlações entre NDVI e as variáveis rendimento de grãos e massa seca da parte aérea foram na maioria dos casos positivas, mostrando que um aumento no rendimento de grãos ou massa seca acarreta no aumento do NDVI (Tabela 4; Tabela 6). A exceção ocorreu para o genótipo URS F Flete no estágio de massa mole do grão, apresentando correlações negativas entre os parâmetros. Com isso, maiores índices de vegetação por diferença normalizada implicam em menores rendimento de grãos e massa seca da parte aérea. Isso demonstra, que diferente dos demais genótipos, o maior rendimento de grãos nesse genótipo ocorre quando há rápida senescência foliar por conta de translocação de fotoassimilados para o grão. Tem-se que antese precoce e senescência foliar atrasada, porém rápida, contribuem para o maior rendimento de grãos, por permitirem a manutenção da fotossíntese por maior período de tempo (Xie *et al.*, 2016b). Esse padrão, ocorre na maioria dos genótipos, mas não é o que acontece com URS F Flete. O elevado número de grãos que este genótipo possui (dados não apresentados) deve estar relacionada com a rápida senescência foliar por maior necessidade de assimilados para suprir o elevado dreno.

O índice de ocupação de plantas (IOP) apresentou alta relação com o índice de vegetação por diferença normalizada (Figura 4). Ainda, teve maiores correlações lineares com o rendimento de grãos do que o NDVI (Tabela 8). Sendo assim, aparentemente o uso de câmeras digitais é uma alternativa na previsão do rendimento de grãos. Li *et al.* (2010), utilizando uma câmera digital, encontraram forte relação do IOP com os parâmetros índice de área foliar, massa seca e conteúdo de nitrogênio nas culturas de aveia e trigo. Entretanto, apesar dos altas

correlações lineares e coeficientes de determinação dos modelos matemáticos, o IOP não foi capaz de prever o rendimento de grãos (Tabela 9). O ensaio utilizado para validação dos modelos foi realizado na safra 2017 e o modelo superestimou o rendimento de grãos, exceto para o genótipo URS F Flete. Esse genótipo, no ensaio de estimativa dos modelos matemáticos, apresentou baixa germinação de sementes e, conseqüentemente, menor população de plantas. Portanto, caso o estabelecimento de população de plantas fosse adequado, possivelmente ocorreria também uma superestimação do rendimento de grãos. Essas informações corroboram com a hipótese dada ao NDVI, onde alterações morfológicas poderiam ter o elevado. Dessa forma, na safra 2017 o dossel de plantas pode ter aumentado a cobertura do solo, aumentando os índices IOP e NDVI.

O índice SPAD é indicativo do teor relativo de clorofila na folha e, por conta disto, também tem sido empregado na determinação de nutrição da planta e potencial produtivo de culturas (Argenta *et al.*, 2003; Kitonyo *et al.*, 2018). No entanto, foram observados valores baixos de correlação deste parâmetro com o rendimento de grãos, exceto para o estágio fenológico de seis folhas completamente expandidas (Tabela 10). Mas a distribuição dos pontos amostrais sugere que não há relação entre o índice SPAD e o rendimento de grãos (Figura 6). Dessa forma, ocorre que o rendimento de grãos independe do rendimento de grãos, onde baixos valores de NDVI podem resultar tanto em baixos, quanto em altos rendimentos de grãos. O fato do índice SPAD ser uma medida pontual, onde seu valor informa o teor relativo de clorofila de uma área restrita da planta pode explicar a falta de relação entre os parâmetros. Como a mensuração do índice SPAD foi realizado na última folha completamente expandida o valor do índice poderia ser sempre elevado, mesmo nas menores doses. Isso porque o processo de senescência inicia pelas folhas mais velhas em condições de limitação de

nitrogênio, permitindo que a última folha completamente expandida apresente altos teores deste nutriente (Kitonyo *et al.*, 2018).

4.2 Conclusões

Os índices NDVI e IOP foram capazes de perceber o aumento da dose nitrogenada, mas o índice SPAD não. Maiores valores de NDVI e IOP estão relacionados a maiores rendimentos de grãos e massa seca da parte área em todos os estádios fenológicos. A exceção ocorre para o genótipo URS F Flete no estágio de massa mole do grão, onde maiores índices são associados a menores rendimentos de grãos e massa seca da parte área, sugerindo que a senescência desse genótipo ocorre de maneira diferente.

Os modelos matemáticos só são capazes de predizer o rendimento de grãos em condições semelhantes às de sua elaboração. Possivelmente o uso de informações de mais de um ano para elaboração do modelo poderia elevar sua acurácia. Ainda, os genótipos não apresentam o mesmo comportamento de produção de massa e alocação desta para o grão, havendo a necessidade de ajustar modelos matemáticos genótipo-específicos.

4.3 Referências bibliográficas

AGUSTIANI, N. et al. Simulating rice and maize yield potential in the humid tropical environment of Indonesia. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 101, n. 3, p. 10-19, 2018.

ALI, A. M. et al. Prediction of dry direct-seeded rice yields using chlorophyll meter, leaf color chart and GreenSeeker optical sensor in northwestern India. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 161, n. 4, p. 11-15, 2014.

ARGENTA, G. et al. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 109-119, 2003.

BREDEMEIER, C. et al. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, Santa

Maria, v. 43, n. 1, p. 1147-1154, 2013.

CAMPBELL, P. K. E. et al. Contribution of chlorophyll fluorescence to the apparent vegetation reflectance. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 404, n. 2–3, p. 433-439, 2008.

CAO, Q. et al. Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 112, p. 54-67, 2015.

CARGNELUTTI FILHO, A.; TOEBE, M.; FACCO, G. Dimensionamento amostral para avaliar caracteres morfológicos e produtivos de aveia preta em épocas de avaliação. **Ciência Rural**, Santa maria, v. 45, n. 1, p. 9-13, 2015.

DIETZ, J. I.; SCHIERENBECK, M.; SIMÓN, R. M. Impact of foliar diseases and its interaction with nitrogen fertilization and fungicides mixtures on green leaf area dynamics and yield in oat genotypes with different resistance. **Crop protection**, Oxford, v. 121, n. 3, p. 80-88, 2019.

DONG, T. et al. Estimating winter wheat biomass by assimilating leaf area index derived from fusion of Landsat-8 and MODIS data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 49, p. 63–74, 2016.

DUAN, T. et al. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 210, n. 1 p. 71–80, 2017.

ERDLE, K.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 124, n. 1, p. 74–84, 2011.

EVANS, L. T. **Crop evolution, adaptation and yield**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 514 p.

FEDERIZZI, L. C. et al. Importância econômica da cultura. In: LÂNGARO, N. C.; DE CARVALHO, I. Q. (Ed.). **Indicações técnicas para a cultura da aveia**. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2014. p. 11-23.

FERNANDEZ-GALLEGO, J. A.; KEFAUVER, S. C.; VATTER, T. Low-cost assessment of grain yield in durum wheat using RGB images. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 105, n.1, p. 146-156, 2019.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: Fealq, 2009. 451 p.

GROHS, D. S. et al. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 101-112, 2009.

GUILPART, N. et al. Estimating yield gaps at the cropping system level. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 206, p. 21–32, 2017.

HAWKINS, T. S.; GARDINER, E. S.; COMER, G. S. Modeling the relationship between extractable chlorophyll and SPAD-502 readings for endangered plant species research. **Journal for Nature Conservation**, Jena, v. 17, n. 2, p. 123–127, 2009.

IPAGRO. **Observações meteorológicas no estado do Rio Grande do Sul**. 3. ed. Porto Alegre: IPAGRO, 1979. 271 p.

ITTERSUM, M. K. Van et al. Yield gap analysis with local to global relevance - A review. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 143, p. 4–17, 2013.

JORGE, L. A. C.; SILVA, D. J. C. B. **SisCob**: manual de utilização. 1. ed. São Carlos: EMBRAPA, 2009. 18 p.

KITONYO, O. M. et al. Nitrogen supply and sink demand modulate the patterns of leaf senescence in maize. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 225, n. 5, p. 92–103, 2018.

LI, Y. et al. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 118, n. 3, p. 221–227, 2010.

MAIMAITIJIANG, M. et al. Vegetation Index Weighted Canopy Volume Model (CVMvi) for soybean biomass estimation from Unmanned Aerial System-based RGB imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 151, n. 5, p. 27–41, 2019.

MANTAI, R. D. et al. A eficiência na produção de biomassa e grãos de aveia pelo uso do nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 343–349, 2015.

MIZUTANI, M.; KANAOKA, M. M. Environmental sensing and morphological plasticity in plants. **Seminars in Cell and Developmental Biology**, London, v. 83, n. 11, 2017.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2011. 422 p.

RÖTTER, R. P. et al. Use of crop simulation modelling to aid ideotype design of future cereal cultivars. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 66, n. 12, p. 3463–3476, 2015.

SHAKOOR, N.; LEE, S.; MOCKLER, T. C. High throughput phenotyping to accelerate crop breeding and monitoring of diseases in the field. **Current Opinion in Plant Biology**, London v. 38, p. 184–192, 2017.

SHI, J. et al. Unraveling the complex trait of crop yield with quantitative trait loci mapping in *Brassica napus*. **Genetics Society of America**, Rockville, v. 182, p. 851–861, 2009.

SMITH, H. L.; MCAUSLAND, L.; MURCHIE, E. H. Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 68, n. 9, p. 2099–2110, 2017.

STRECK, E. V; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. C. D. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222 p.

VIAN, A. L. **Sensores de vegetação para estimativa in situ do potencial produtivo na cultura do milho**. 2015. 68 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

VIAN, A. L. et al. Nitrogen management in wheat based on the normalized difference vegetation index (NDVI). **Ciência rural**, Santa Maria, v. 48, n. 09, p. 1–9, 2018.

XIE, Q.; MAYES, S.; SPARKES, D. L. Preanthesis biomass accumulation of plant and plant organs defines yield components in wheat. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 81, p. 15-26, 2016a.

XIE, Q.; MAYES, S.; SPARKES, D. L. Early anthesis and delayed but fast leaf senescence contribute to individual grain dry matter and water accumulation in wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 187, p. 24-34, 2016b.

ZHANG, Z. et al. Plant development and solar radiation interception of four annual forage plants in response to sowing date in a semi-arid environment. **Industrial Crops & Products**, Amsterdã, v. 131, n. 8, p. 41-53, 2019.

ZHENG, H. et al. Detection of rice phenology through time series analysis of ground-based spectral index data. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 198, p. 131-139, 2016.

5 CAPITULO 3

Efeito da adubação nitrogenada no crescimento, rendimento de grãos e índice de vegetação por diferença normalizada de cinco genótipos de aveia branca

5.1 Introdução

A massa seca vegetativa produzida pela planta tem impacto no rendimento de grãos e é uma característica complexa sendo influenciada por diversos fatores. Ela pode ser definida, de forma simplificada, pelo produto da capacidade da planta no uso da radiação e de interceptação da luz (Reynolds *et al.*, 2012). A arquitetura de plantas, o tamanho do dossel e a longevidade definem o potencial de interceptação da luz, enquanto o incremento na taxa fotossintética é necessário para elevar a eficiência no uso da radiação (Reynolds *et al.*, 2012). Com isso, um mesmo genótipo, dependendo do manejo realizado pode apresentar diferentes capacidades de produção de massa seca vegetativa e, conseqüentemente, rendimento de grãos.

O comportamento de senescência foliar é tão importante quanto a massa seca produzida (Gregersen *et al.*, 2013). Durante o enchimento de grãos, os assimilados fornecidos aos grãos são provenientes da fotossíntese e da remobilização de folhas e colmos (Xie *et al.*, 2016). Logo, a massa seca produzida serve como fonte e a fotossíntese que ocorre por ocasião do enchimento de grãos a complementa, portanto a senescência foliar tardia é considerada favorável ao rendimento de grãos (Gregersen *et al.*, 2013).

O manejo da adubação nitrogenada apresenta grande impacto na capacidade fotossintética e na senescência da planta (Poorter, 1998), sendo que o aumento na capacidade fotossintética da planta é necessário para a obtenção de maiores rendimentos de grãos em cereais (Yin *et al.*, 2019). A disponibilidade de nitrogênio pode estender a duração da área foliar, atrasando a senescência e possibilitando um aumento de rendimento (Gregersen *et al.*, 2013). Além disto, nutrientes estruturais, particularmente o nitrogênio, podem ser parcialmente reciclados durante a senescência para o enchimento dos grãos (Gregersen *et*

al., 2013). Assim, espera-se que plantas que possuam maior aporte de nitrogênio em seu tecido apresentem maior capacidade de enchimento de grãos.

Sensores ópticos proximais estão sendo cada vez mais empregados na agricultura (Shakoor *et al.*, 2017). Os sensores ópticos são utilizados para estimativa de índices vegetativos, dentre os quais o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) tem se destacado. O NDVI surgiu com a proposta de acompanhar a dinâmica vegetativa do planeta Terra, utilizando a reflectância do dossel de plantas na região do vermelho e do infravermelho próximo. A reflectância no infravermelho próximo reflete a quantidade de matéria seca do dossel, enquanto a reflectância na região do vermelho a quantidade de clorofila presente no tecido da planta (Smith *et al.*, 2017; Vian *et al.*, 2018).

Posteriormente, outras funções foram atribuídas ao NDVI, principalmente na agricultura com o uso de sensores ópticos proximais. Esse se correlaciona com o índice de área foliar, massa seca da parte aérea e rendimento de grãos, sendo mais sensível quando o dossel de plantas está ainda pouco desenvolvido, uma vez que o índice tende a saturar com o aumento da cobertura do solo (Duan *et al.*, 2017). Ainda, o perfil temporal do NDVI é utilizado no monitoramento de características do dossel de plantas durante o desenvolvimento da cultura (Hassan *et al.*, 2018; Magney *et al.*, 2016).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi determinar o impacto da adubação nitrogenada em parâmetros de crescimento e no rendimento de grãos de cinco genótipos de aveia branca e verificar a capacidade do NDVI em acompanhar o crescimento da cultura.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Local de desenvolvimento dos experimentos

O experimento foi conduzido na safra 2018 na estação experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA-UFRGS), localizada no município de Eldorado do Sul, situada na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul, nas coordenadas geográficas 30°05'22" S e 51°39'08" W. O clima é caracterizado como subtropical de verão úmido quente, do tipo Cfa, conforme a classificação de Koppen (IPAGRO, 1979), com altitude média de 46 metros acima do nível do mar.

Anexo ao experimento, foi instalada uma estação meteorológica para acompanhamento das condições ambientais durante o período de condução dos experimentos. A precipitação pluvial acumulada e a temperatura média do ar, entre a germinação e a colheita (19/09/2018 e 09/11/2017) foram de 547 mm e 15,7°C (Apêndice 1).

O solo da área experimental pertence à unidade de mapeamento São Jerônimo, caracterizado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2008). Trata-se de um solo bem drenado, com relevo ondulado e baixa fertilidade natural. No entanto, o experimento foi alocado em área plana e a fertilidade foi corrigida. A análise do solo da área experimental é apresentada na TABELA 1.

TABELA 1. Análise de solo da área experimental da safra 2018. UFRGS, Faculdade de Agronomia, departamento de solos, laboratório de análises, 2018.

Argila	MO	pH	Índice	P	K	% Sat. da CTC	
%		H ₂ O	SMP	mg dm ⁻³		Bases	Al
28	2	4,9	5,9	21	185	52	1,9
Al_{troc.}	Ca_{troc.}	Mg_{troc.}	Al+H	CTC	Relações		
cmol _c dm ⁻³					Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0,1	3,2	1,6	4,9	10,2	2	7	3,4

5.2.2 Caracterização do experimento

O experimento foi realizado na safra 2018. Genótipo e dose de adubação nitrogenada foram os fatores experimentais empregados. Foram conduzidos cinco genótipos de aveia branca (URS Altiva, URS Corona, URS F Flete, URS Taura e URS 21) e quatro doses de adubação nitrogenada (0, 30, 60 e 90 kg de N ha⁻¹). As doses utilizadas estão de acordo com as normalmente utilizadas em lavouras comerciais e utilizou-se ureia como fonte de nitrogênio. A aplicação de base de nitrogênio ocorreu por ocasião da semeadura, via manual, de acordo com a dose do tratamento. Foram realizadas duas adubações nitrogenadas de cobertura. A primeira quando as plantas se encontravam no estágio fenológico de três folhas completamente expandidas e a segunda com seis folhas completamente expandidas. As três aplicações de nitrogênio foram divididas igualmente, conforme a dose do tratamento (Tabela 2).

TABELA 2. Quantidade total de nitrogênio aplicada no tratamento e quantidades parciais de nitrogênio aplicadas (kg de N ha⁻¹), conforme o momento de aplicação.

Quantidade total de N aplicada	Momento de aplicação da adubação nitrogenada		
	Base	Três folhas	Seis folhas
0	0	0	0
30	10	10	10
60	20	20	20
90	30	30	30

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso em arranjo fatorial, com quatro repetições. As unidades experimentais consistiram em cinco linhas de oito metros de comprimento, espaçadas em 0,20 metros entre si. De forma mecanizada, a semeadura foi realizada em 15 de junho de 2018, com densidade ajustada para 350 sementes aptas a germinar por metro quadrado. A adubação de base foi de 400 kg ha⁻¹ de fertilizante da fórmula 0-20-20 (N-P-K).

O experimento foi implantado após o cultivo de soja na área experimental. O manejo de doenças foi realizado sempre que necessário.

Nos estádios fenológicos de seis folhas completamente expandidas, alongamento de entrenós, florescimento, massa mole do grão e colheita foram realizadas coletas de massa seca da parte aérea. As amostras constituíram-se de três linhas de 0,60 metros, totalizando 0,36 metros quadrados. Essas amostras foram separadas em parte vegetativa e reprodutiva e, posteriormente, secas em estufa com ventilação forçada a 60°C, até obtenção de massa constante e, então, a massa seca foi determinada.

Após a determinação da massa seca, as amostras foram moídas e os teores de nitrogênio e de fósforo no tecido foram determinados. O teor de nitrogênio foi determinado pelo método Kjeldahl e o fósforo pelo método azul de molibdato, ambas análises realizadas conforme metodologia descrita em Tedesco *et al.* (1995). Utilizando os mesmos procedimentos, determinou-se também os teores de nitrogênio e fósforo no grão descascado. Multiplicando-se a massa seca acumulada pelo teor de nitrogênio e fósforo no tecido vegetativo ou no grão, obteve-se a quantidade de nitrogênio e fósforo acumulada.

A estatura da planta foi determinada quando a 50% do experimento estava no estágio fenológico de massa mole do grão. A estatura consistiu no comprimento em centímetros entre a base da planta e o ápice da panícula. Foram estimadas a estatura de cinco plantas aleatórias na parcela. O número de folhas verdes foi estimado em cinco plantas aleatórias nos estádios de florescimento e massa mole do grão. Contabilizou-se como folha verde aquela que apresentasse mais que 50% da lâmina foliar ainda verde.

Cinco panículas de colmos principais foram utilizadas para determinação dos componentes do rendimento número de grãos por panícula e massa de mil

grãos. As panículas foram debulhadas manualmente, contabilizou-se o número de grãos, esses foram levados a estufa com ventilação forçada a 60°C e, posteriormente, determinou-se a massa seca dos grãos. O total do número de grãos foi dividido por cinco, resultando no número de grãos por panícula. A massa de mil grãos foi obtida pela extrapolação da massa dos grãos.

Para a estimativa do rendimento de grãos foram utilizadas apenas as três linhas centrais, excluindo-se a bordadura. Para isto, antes de realizar o procedimento da colheita, as bordaduras foram retiradas da parcela e a área útil de cada parcela foi mensurada. Isto porque os cortes da massa seca, ocasionalmente, tiveram diferentes tamanhos de bordadura (bordadura dentro da parcela, entre um corte e outro), logo resultaram em diferentes comprimentos finais de parcela. O comprimento útil da parcela variou entre 3,7 e 4,9 metros, com área útil média de 2,6 metros quadrados. Os menores comprimentos são referentes as parcelas do genótipo URS F Flete, que apresentou menor população de plantas, por consequência da reduzida germinação de sementes que acarretou em falhas na linha de cultivo. A colheita foi realizada de forma mecanizada. Foi determinada a massa úmida dos grãos, posteriormente foram secos em estufa de ventilação forçada a 60°C e determinou-se a massa seca dos grãos. Então, estimou-se o rendimento de grãos ajustado para 13% de umidade.

Para verificar a capacidade das plantas em utilizar o nitrogênio aplicado e converte-lo em rendimento de grãos, estimou-se a eficiência agrônômica do uso de nitrogênio, dada por:

$$EUN = \frac{RG_{cf} - RG_{sf}}{QNa} \quad (\text{EQUAÇÃO 1})$$

Onde, EUN é a eficiência agrônômica do uso do nitrogênio (kg kg⁻¹), RG_{cf} é o rendimento de grãos com a aplicação do fertilizante nitrogenado (kg ha⁻¹), RG_{sf}

é o rendimento de grãos sem a aplicação do fertilizante nitrogenado (kg ha^{-1}) e QN_a é a quantidade de nitrogênio aplicada (kg ha^{-1}).

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) foi estimado pelo sensor óptico ativo Greenseeker. Este sensor utiliza diodos de emissão de radiação nos comprimentos de onda do vermelho (650nm) e do infravermelho próximo (770nm), cuja razão normalizada fornece o valor de NDVI. O sensor foi posicionado sobre a linha central da parcela, aproximadamente, um metro de altura acima do dossel de plantas. A estimativa do índice foi realizada durante todo o ciclo da cultura, incluindo o momento que antecede as coletas de massa seca da parte aérea.

Os dados foram submetidos à análise de normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e transformados quando rejeitada a hipótese de nulidade. As transformações empregadas foram: $Y = \text{Raiz}(X)$ e MMG por $Y = (X)^{3/3}$. Posteriormente, empregou-se a análise de variância pelo teste F para verificação dos fatores de variação. Foram estimadas as médias de cada parâmetro e o intervalo de confiança de 95%, estimado por:

$$IC(1 - \alpha) = \bar{X} \pm t_{\frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{EQUAÇÃO 2})$$

Onde α é o nível de significância, \bar{X} é a média amostral, s é o desvio padrão da amostra e n o número de repetições da amostra. Todas as análises foram realizadas nos softwares SAS 9.4 e SigmaPlot 14.0.

5.1 Resultados

A variação na dose de nitrogênio afetou o crescimento das plantas de aveia e, por consequência, o rendimento de grãos. A análise de variância dos parâmetros avaliados é apresentada na TABELA 3. Dentre os parâmetros relacionados com o crescimento das plantas, apresentaram interação entre os

fatores genótipo e dose de nitrogênio o rendimento de grãos, número de grãos por planta e massa seca da parte vegetativa nos estádios de alongamento de entrenós, massa mole do grão e colheita. Ainda, a grande maioria dos parâmetros, como estatura, número de grãos por panícula, nitrogênio e fósforo acumulado no grão apresentaram efeito significativo para os fatores genótipo e dose de nitrogênio (Tabela 3).

A interação significativa entre os fatores experimentais genótipo e dose de nitrogênio para o parâmetro rendimento de grãos evidencia a dependência destes na definição dessa variável. As respostas dos genótipos às crescentes doses de nitrogênio são apresentadas na FIGURA 1. Todos os genótipos exibiram resposta linear para as doses de nitrogênio empregadas no experimento.

TABELA 3. Análise de variância do experimento com variação de dose de nitrogênio. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

Fator de variação	MVSF ¹	MVAE	MVFL	MVMS	MVCO	MRFL	MRMS	MRCO	MTFL	MTMM	MTCO	RDM	EST	NGP	MMG	RRT	TNG
Genótipo	**	**	ns	**	*	**	**	**	ns	**	*	**	**	**	**	**	**
Dose	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	*	ns
Genótipo*Dose	ns	**	ns	**	*	ns	ns	ns	ns	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns
Bloco	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	24,95	15,49	15,55	15,47	18,35	21,6	19,12	16,02	15,44	15,33	16,51	12,748	5,65	21,66	17,03	5,74	11,95
TPG	NAG	PAG	FVFL	FVMM	TNSF	TNAE	TNFL	TNMM	TNCO	NASF	NAAE	NAFL	NAMM	NACO	EUN	-	-
Genótipo	**	**	**	**	*	**	ns	ns	ns	**	ns	ns	**	*	**	-	-
Dose	**	**	ns	ns	**	**	**	ns	ns	**	**	**	**	**	ns	-	-
Genótipo*Dose	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-
Bloco	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-
CV (%)	17,21	17,31	35,68	10,11	46,02	21,86	17,25	8,93	29,74	25,42	28,39	24,89	22,35	31,39	37,88	43,02	-

¹ MVSF: massa seca vegetativa em seis folhas completamente expandidas; MVAE: massa seca vegetativa em alongamento de entrenós; MVFL: massa seca vegetativa em florescimento; MVMS: massa seca vegetativa em massa mole do grão; MVCO: massa seca vegetativa na colheita; MRFL: massa seca reprodutiva em florescimento; MRMS: massa seca reprodutiva em massa mole do grão; MRCO: massa seca reprodutiva na colheita; MTFL: massa seca total em florescimento; MTMS: massa seca total em massa mole do grão; MTCO: massa seca total na colheita; RDM: Rendimento de grãos; EST: Estatura de plantas; NGP: número de grãos por panícula; MMG: massa de mil grãos; RRT: relação entre massa seca reprodutiva e massa seca total; TNG: teor de nitrogênio no grão; TPG: teor de fósforo no grão; NAG: nitrogênio acumulado no grão; PAG: fósforo acumulado no grão; FVFL: número de folhas verdes no estádio de florescimento; FVMM: número de folhas verdes no estádio de massa mole do grão; TNSF: teor de nitrogênio no tecido vegetativo em seis folhas completamente expandidas; TNAE: teor de nitrogênio no tecido vegetativo em alongamento de entrenós; TNFL: teor de nitrogênio no tecido vegetativo em florescimento; TNMM: teor de nitrogênio no tecido vegetativo em massa mole do grão; NASF: nitrogênio acumulado no tecido vegetativo em seis folhas completamente expandidas; NAAE: nitrogênio acumulado no tecido vegetativo em alongamento de entrenós; NAFL: nitrogênio acumulado no tecido vegetativo em florescimento; NAMM: nitrogênio acumulado no tecido vegetativo em massa mole do grão; NACO: nitrogênio acumulado no tecido vegetativo na colheita. EUN: eficiência agrônômica no uso do nitrogênio. TPG e TNFL foram transformados por $Y = \text{Raiz}(X)$ e MMG por $Y = (X)^{3/3}$, ns: não significativo; * Significativo pelo teste F a 5%; ** Significativo pelo teste F a 1%.

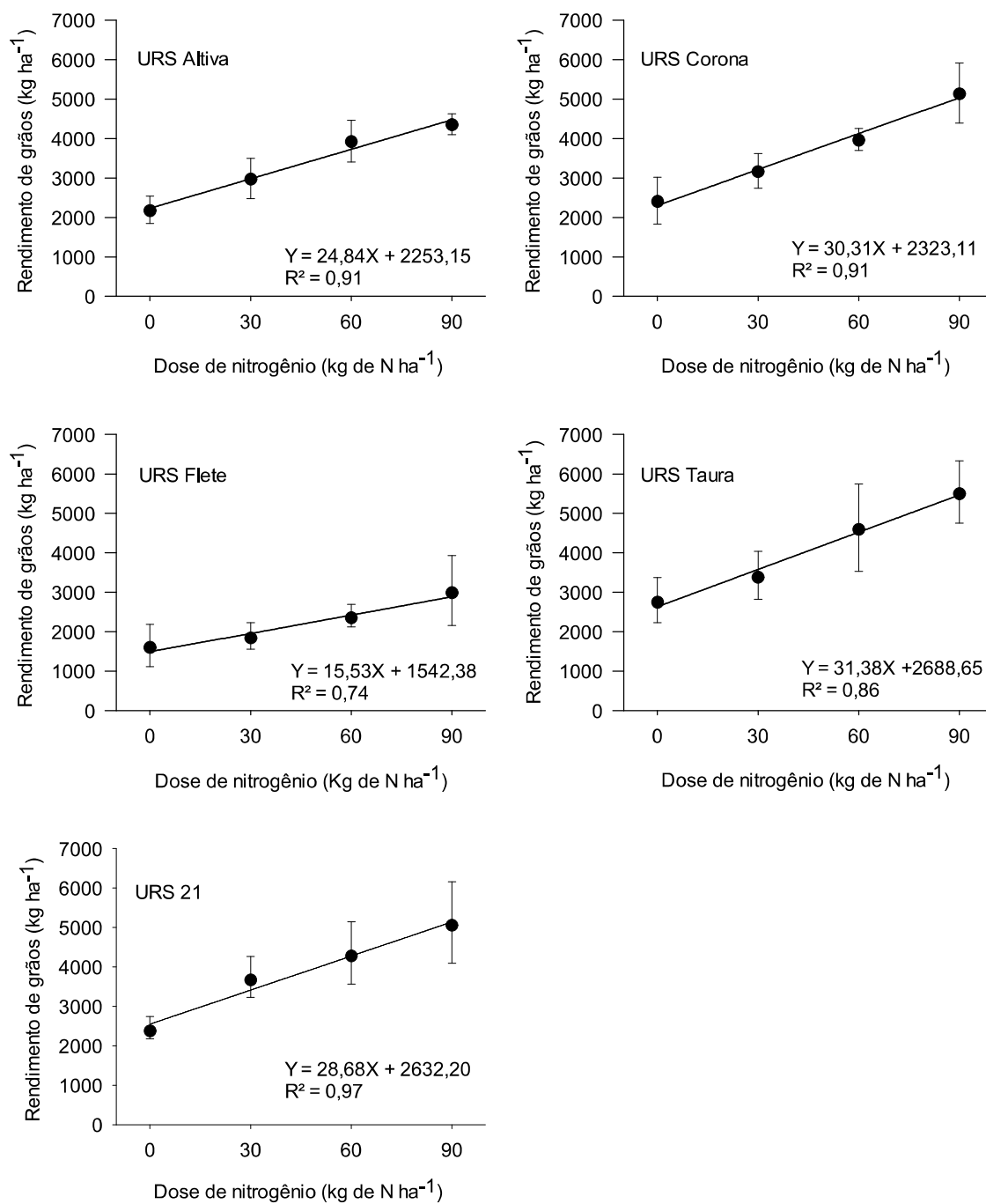


FIGURA 1. Rendimento de grãos de cinco genótipos de aveia-branca em resposta a crescentes doses de adubação nitrogenada. Barras representam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

URS Taura e URS Corona foram os genótipos mais responsivos à adubação nitrogenada, produzindo aproximadamente 31 kg ha⁻¹ de grãos de aveia para cada quilograma de nitrogênio aplicado. No entanto, o valor de

intercepto apresentado por URS Taura é maior, resultando em maior rendimento de grãos. Isto é evidenciado na dose de 90 kg de N ha⁻¹, onde URS Taura obteve o rendimento de grãos de 5793 kg ha⁻¹, enquanto URS Corona 5151 kg ha⁻¹. Por outro lado, URS F Flete foi o genótipo menos responsivo à adubação nitrogenada, com rendimento máximo de 3029 kg ha⁻¹. Para confirmar a responsividade a adubação nitrogenada, estimou-se a eficiência no uso do nitrogênio de cada genótipo (Tabela 4). Houve efeito significativo dessa variável apenas para o fator genótipo (Tabela 3), sendo que o único genótipo que diferiu dos demais estatisticamente foi URS F Flete, com menor eficiência agrônômica no uso do nitrogênio (Tabela 4).

TABELA 4. Eficiência agrônômica do uso do nitrogênio (kg kg⁻¹) de cinco genótipos de aveia branca, em três doses de adubação nitrogenada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

Genótipo	Dose de nitrogênio (kg ha ⁻¹)		
	30	60	90
URS Altiva	26,42	29,01	24,09
URS Corona	26,88	33,78	32,05
URS F Flete	-1,58	13,45	15,91
URS Taura	20,96	29,46	33,22
URS 21	42,88	39,88	29,62

O perfil temporal do índice de vegetação por diferença normalizada é utilizado no monitoramento de características do dossel de plantas durante o desenvolvimento da cultura (Hassan *et al.*, 2018; Magney *et al.*, 2016). Para verificar se o perfil de NDVI acompanha a dinâmica vegetativa da cultura de aveia os valores do NDVI foram plotados junto das massas secas vegetativas e reprodutivas de cada genótipo e dose de nitrogênio (Figura 2; Figura 3; Figura 4; Figura 5; Figura 6).

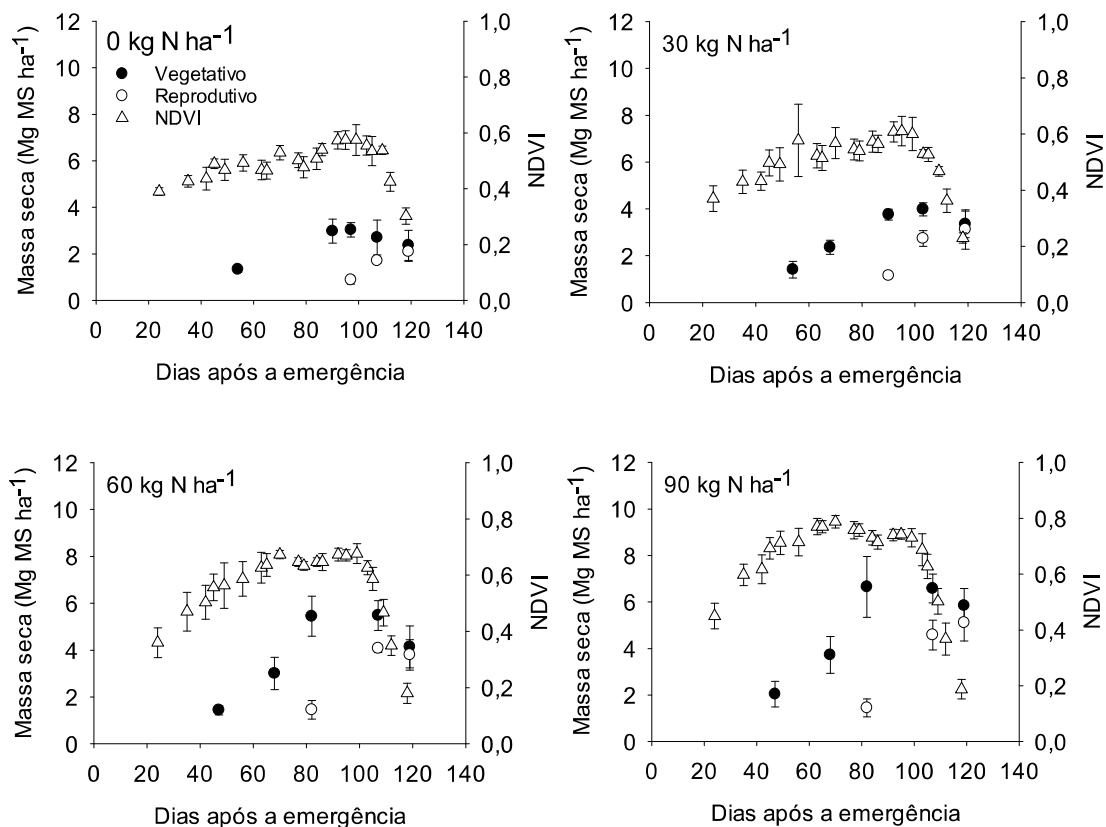


FIGURA 2. Perfil temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – triângulos brancos), da massa seca do tecido vegetativo (círculos pretos) e da massa seca reprodutiva (círculos brancos) do genótipo URS Taura em diferentes doses de adubação nitrogenada. Barras indicam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

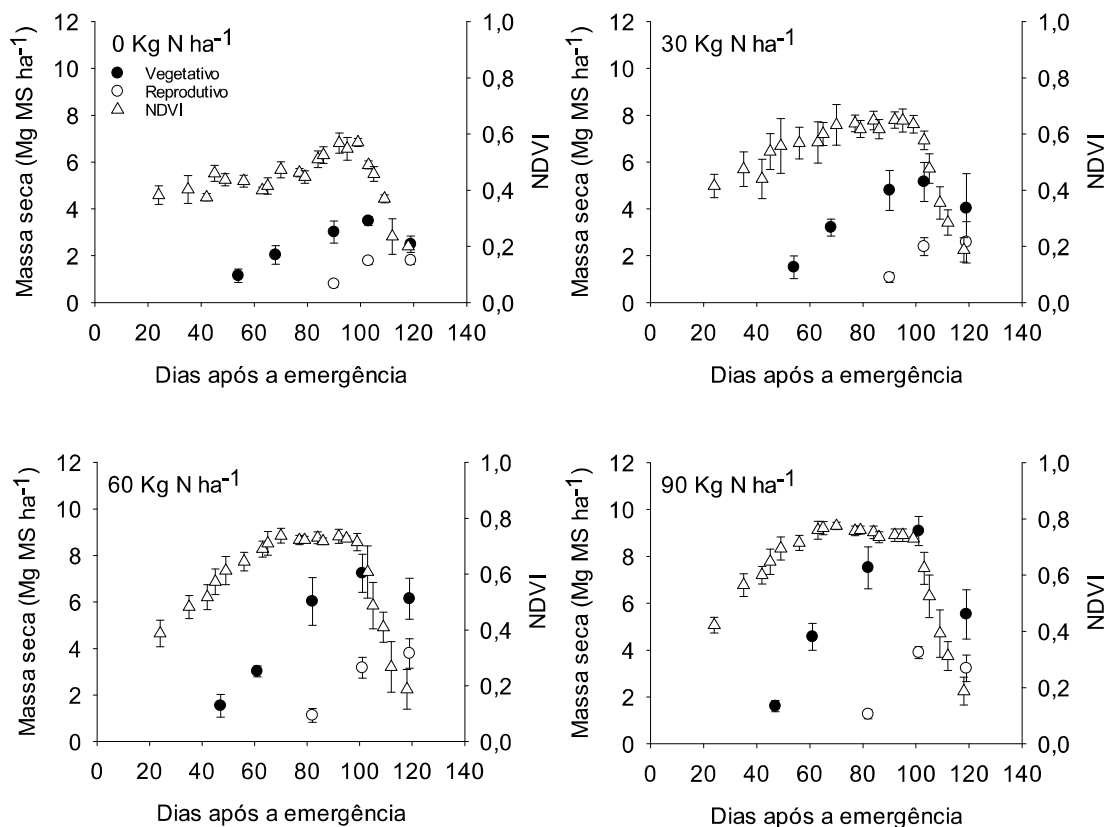


FIGURA 3. Perfil temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – triângulos brancos), da massa seca do tecido vegetativo (círculos pretos) e da massa seca reprodutiva (círculos brancos) do genótipo URS Altiva em diferentes doses de adubação nitrogenada. Barras indicam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

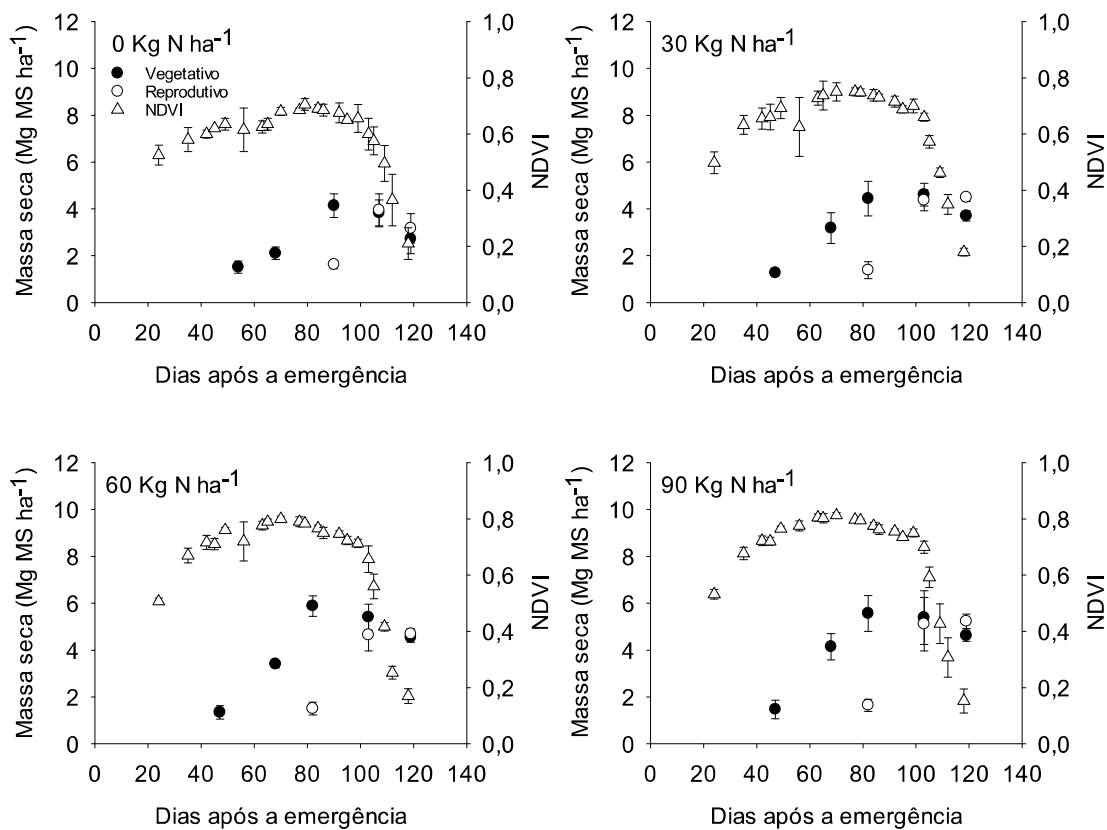


FIGURA 4. Perfil temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – triângulos brancos), da massa seca do tecido vegetativo (círculos pretos) e da massa seca reprodutiva (círculos brancos) do genótipo URS Corona em diferentes doses de adubação nitrogenada. Barras indicam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

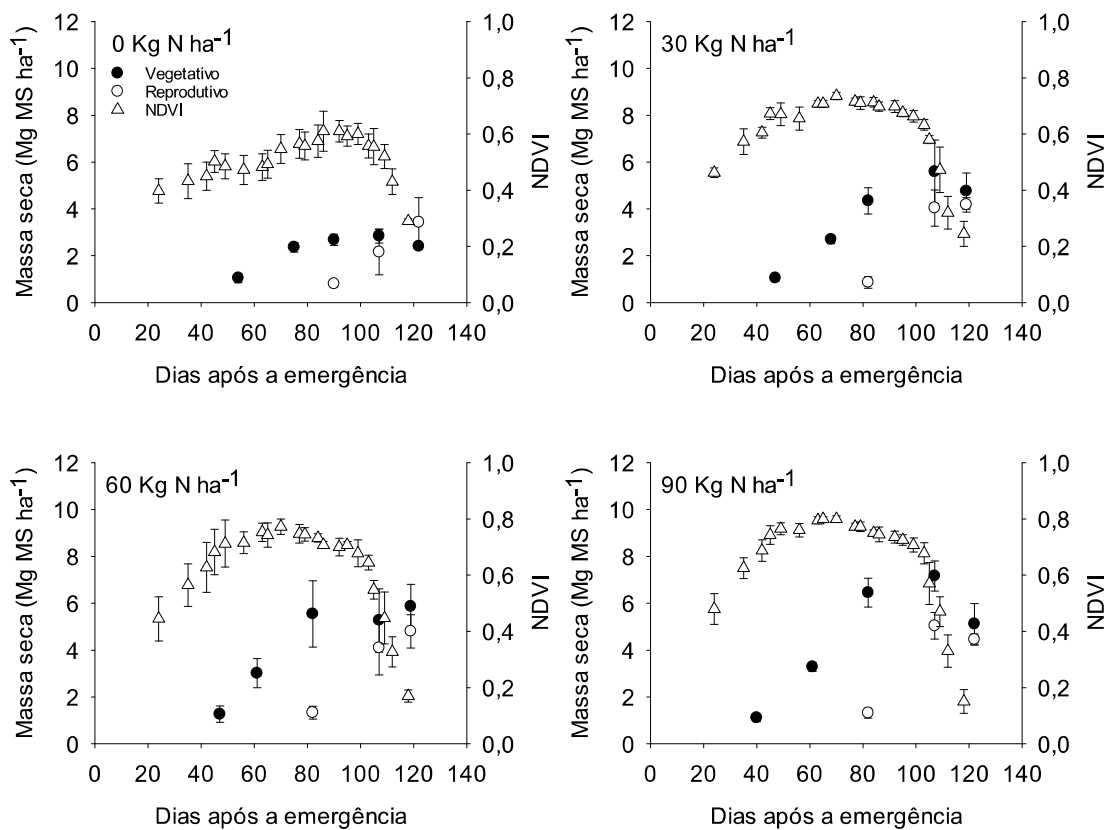


FIGURA 5. Perfil temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – triângulos brancos), da massa seca do tecido vegetativo (círculos pretos) e da massa seca reprodutiva (círculos brancos) do genótipo URS 21 em diferentes doses de adubação nitrogenada. Barras indicam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

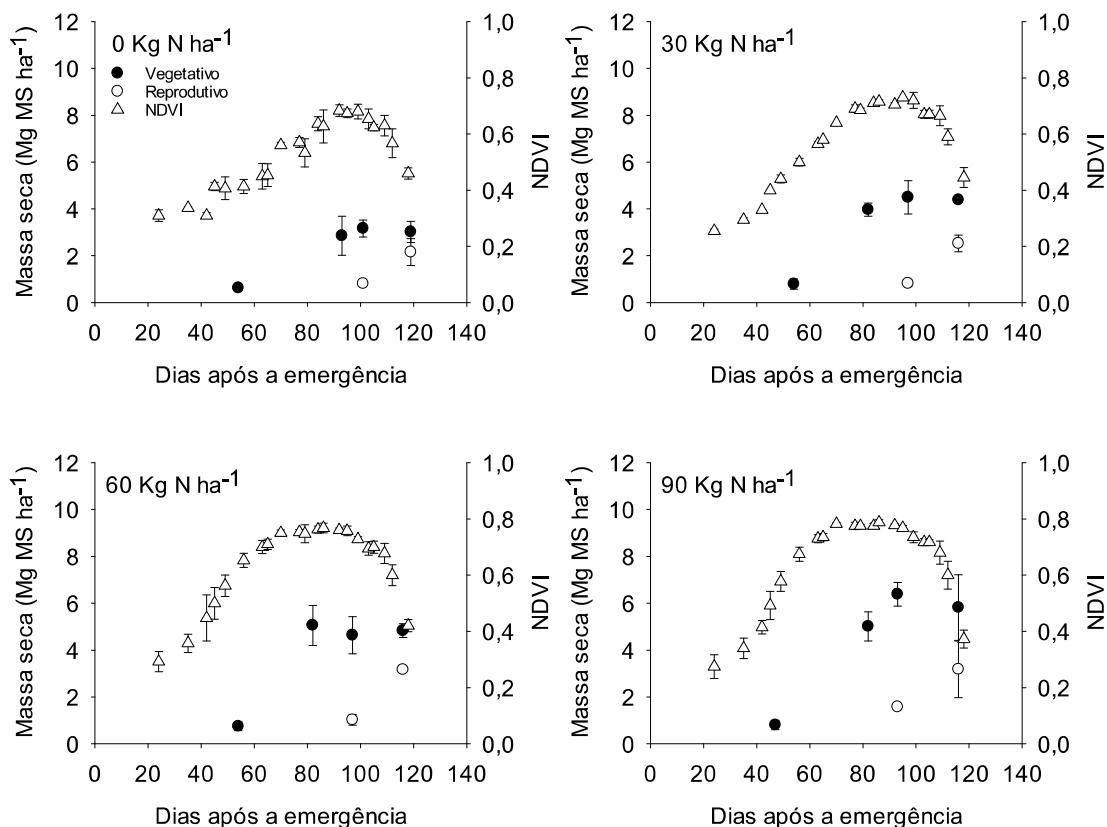


FIGURA 6. Perfil temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – triângulos brancos), da massa seca do tecido vegetativo (círculos pretos) e da massa seca reprodutiva (círculos brancos) do genótipo URS F Flete em diferentes doses de adubação nitrogenada. Barras indicam o intervalo de confiança ($p < 0,05$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

A massa seca vegetativa, em todos os genótipos, apresentou incremento com o aumento da dose da adubação nitrogenada. O NDVI aumentou conforme avançou o desenvolvimento da cultura até encontrar um valor de saturação. Esse valor é diferente para cada dose de nitrogênio e genótipo, sendo mais proeminente nas doses de 60 e 90 kg de N ha⁻¹, onde a massa seca teve grande incremento entre os estádios fenológicos de alongamento de entrenós e florescimento, mas o NDVI foi pouco alterado. Em adição, o momento em que o NDVI encontrou saturação foi marcado por menor variação dos valores das repetições em torno da média, resultando em menores intervalos de confiança (Figura 2; Figura 3; Figura 4; Figura 5; Figura 6).

As maiores massas secas da parte vegetativa foram normalmente observadas no estágio fenológico de massa mole do grão, mas nem sempre foi significativamente diferente das massas secas no florescimento (Tabela 5). Entre o florescimento e a massa mole do grão o NDVI começou a decrescer, diminuindo drasticamente após a massa mole do grão. Durante este processo, a massa seca do tecido reprodutivo aumentou (Figura 2; Figura 3; Figura 4; Figura 5; Figura 6). Ainda, a massa seca vegetativa na colheita é inferior à do estágio de massa mole do grão (Tabela 5).

O aumento na dose nitrogenada elevou o rendimento de grãos e o número de grãos por planta (Tabela 7). O aumento no crescimento da planta também foi observado, havendo maiores estaturas de plantas nas maiores doses, assim como havia sido observado para a massa seca acumulada. Por outro lado, a relação entre massa seca reprodutiva e massa seca total da parte aérea teve tendência a reduzir com o incremento da dose.

Se tratando de crescimento de plantas, o genótipo URS Altiva teve a maior responsividade à adubação nitrogenada, apresentando incremento de 35% de estatura de plantas e 150% de massa seca vegetativa no florescimento, referente a diferença entre a dose 0 e 90 kg de N ha⁻¹ (Tabela 5; Tabela 7). No entanto, o incremento no rendimento de grãos não foi proporcional ao crescimento da planta, apresentando os menos valores de relação entre massa seca do tecido reprodutivo e massa seca total da parte aérea (Tabela 7).

Não houve efeito significativo do fator dose de nitrogênio para o parâmetro teor de nitrogênio no grão, assim como para a massa de mil grãos. No entanto, houve efeito significativo da adubação nitrogenada para o número de grãos por panícula (Tabela 3). Portanto, a deficiência de nitrogênio limita o crescimento da planta, mas mantém o teor de nitrogênio em tecidos, bem como a massa de

grãos por panícula. Mas como o número de grãos por panícula aumenta com a dose nitrogenada, o nitrogênio acumulado nos grãos aumenta gradativamente com o aumento da dose nitrogenada (Tabela 8). O mesmo cenário é visto para o teor de fósforo e suas quantidades acumuladas no grão.

Houve redução do número de folhas verdes entre estes estádios fenológicos florescimento e massa mole do grão, sendo que as maiores doses de nitrogênio apresentaram maior número de folhas verdes em ambos os estádios fenológicos, exceto para URS F Flete (Tabela 8). Essa redução do número de folhas verdes acompanha a redução do NDVI citada anteriormente.

O teor de nitrogênio no tecido vegetativo foi afetado pela dose de nitrogênio nos estádios fenológicos de seis folhas completamente expandidas, alongamento de entrenós e florescimento (Tabela 3). Conforme a planta avançou nos estádios fenológicos que envolvem a remobilização de fotoassimilados e senescência foliar, a diferença entre os tratamentos deixou de existir. No entanto, o nitrogênio acumulado no tecido vegetativo apresentou efeito significativo para a dose de nitrogênio em todos os estádios fenológicos.

Os maiores teores de nitrogênio no estágio de seis folhas completamente expandidas foram observados em URS F Flete e URS 21, que apresentaram na dose de 90 kg de N ha⁻¹, respectivamente 6,00% e 5,36% de nitrogênio no tecido (Tabela 9). No entanto, no estágio de alongamento de entrenós, URS 21 reduziu o teor para 3,99 % e URS F Flete para 2,98%, mas URS Altiva, apresentou 4,34%, sendo o maior valor para o estágio de alongamento de entrenós e semelhante ao deste genótipo no estágio de seis folhas completamente expandidas. No florescimento, o fator genótipo deixou de apresentar efeito sobre o teor de nitrogênio no tecido, havendo diferenças apenas para a dose de nitrogênio, onde o teor incrementou com o aumento na dose de nitrogênio

(Tabela 3; Tabela 9). Os teores de nitrogênio no tecido foram reduziram, em todos os genótipos, conforme avançou o desenvolvimento da cultura.

A quantidade acumulada de nitrogênio no tecido vegetativo acompanhou as maiores massas secas, sendo o genótipo URS Altiva o que apresentou maior acúmulo de nitrogênio em tecido vegetativo em todos os estádios fenológicos, chegando a 198 kg de N ha⁻¹ no alongamento de entrenós (Tabela 10). A quantidade acumulada de nitrogênio no tecido vegetativo se eleva até o alongamento de entrenós, se mantém no florescimento e reduz a partir de então, como reflexo da senescência foliar (Tabela 8; Tabela 10).

TABELA 5. Médias e intervalos de confiança (95%) da massa seca do tecido vegetativo (kg ha^{-1}) nos estádios fenológicos de seis folhas completamente expandidas (MVSF), alongamento de entrenós (MVAE), florescimento (MVFL), massa mole do grão (MVM) e colheita (MVCO) de cinco genótipos de aveia-branca, sob quatro doses de adubação nitrogenada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

Genótipo	Dose	MVSF	MVAE	MVFL	MVM	MVCO
URS Altiva	0	1146 ± 283	2037 ± 391	3014 ± 463	3486 ± 185	2493 ± 339
	30	1507 ± 472	3210 ± 357	4792 ± 839	5153 ± 814	4028 ± 1456
	60	1535 ± 475	3021 ± 232	6028 ± 1008	7236 ± 799	6139 ± 860
	90	1604 ± 236	4569 ± 569	7514 ± 877	9083 ± 607	5528 ± 1032
URS Corona	0	1361 ± 314	2094 ± 189	3907 ± 529	3759 ± 401	2787 ± 449
	30	1271 ± 110	3181 ± 643	4444 ± 724	4611 ± 475	3708 ± 215
	60	1343 ± 286	3406 ± 153	5880 ± 434	5407 ± 545	4537 ± 191
	90	1465 ± 391	4144 ± 545	5569 ± 752	5389 ± 1132	4618 ± 229
URS F Flete	0	621 ± 68	2852 ± 819	3167 ± 357	3018 ± 443	-
	30	741 ± 173	3889 ± 237	4593 ± 515	4148 ± 409	-
	60	743 ± 185	5056 ± 837	4639 ± 781	4833 ± 285	-
	90	799 ± 194	5014 ± 604	6389 ± 493	5820 ± 1372	-
URS Taura	0	1333 ± 119	2981 ± 499	3037 ± 310	2704 ± 741	2370 ± 638
	30	1410 ± 350	2362 ± 296	3764 ± 224	3986 ± 272	3347 ± 552
	60	1435 ± 193	3007 ± 680	5444 ± 838	5481 ± 626	4139 ± 877
	90	2042 ± 546	3727 ± 770	6653 ± 1278	6583 ± 605	5847 ± 717
URS 21	0	1042 ± 199	2368 ± 201	2681 ± 237	2847 ± 293	2407 ± 129
	30	1046 ± 129	2701 ± 174	4347 ± 545	5583 ± 1338	4764 ± 752
	60	1264 ± 343	3015 ± 611	5542 ± 1387	5264 ± 1329	5868 ± 926
	90	1104 ± 159	3285 ± 188	6451 ± 606	7167 ± 628	5118 ± 851

- Dados não coletados.

TABELA 6. Médias e intervalos de confiança (95%) da massa seca do tecido reprodutivo (kg ha^{-1}) nos estádios fenológicos de florescimento (MRFL), massa mole do grão (MRMM) e colheita (MRCO) e massa seca total nos estádios fenológicos de florescimento (MTFL), massa mole do grão (MTMM) e colheita (MTCO) de cinco genótipos de aveia-branca, sob quatro doses de adubação nitrogenada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

Genótipo	Dose	MRFL	MRMM	MRCO	MTFL	MTMM	MTCO
URS Altiva	0	796 ± 158	1778 ± 149	1799 ± 174	3810 ± 811	5264 ± 330	4292 ± 508
	30	1069 ± 210	2389 ± 380	2576 ± 864	5861 ± 917	7542 ± 1111	6604 ± 2318
	60	1124 ± 292	3174 ± 435	3792 ± 617	7152 ± 1289	10410 ± 1164	9931 ± 1441
	90	1265 ± 199	3896 ± 244	3222 ± 557	8779 ± 1063	12979 ± 772	8750 ± 1579
URS Corona	0	1435 ± 398	3704 ± 737	3361 ± 631	5343 ± 992	7463 ± 1180	6148 ± 1127
	30	1384 ± 350	4370 ± 508	4493 ± 164	5828 ± 952	8981 ± 1047	8201 ± 306
	60	1503 ± 308	4648 ± 775	4685 ± 254	7382 ± 723	10056 ± 1349	9222 ± 436
	90	1641 ± 255	5111 ± 1117	5229 ± 303	7211 ± 1006	10500 ± 2195	9847 ± 477
URS F Flete	0	806 ± 94	2157 ± 654	-	3972 ± 506	5176 ± 1165	-
	30	981 ± 336	2444 ± 327	-	5574 ± 676	6593 ± 695	-
	60	1021 ± 216	3167 ± 22	-	5660 ± 994	8000 ± 301	-
	90	1574 ± 145	3181 ± 1184	-	8148 ± 488	9000 ± 2113	-
URS Taura	0	880 ± 202	1704 ± 127	2102 ± 473	3917 ± 559	4407 ± 731	4472 ± 1183
	30	1153 ± 79	2736 ± 329	3125 ± 827	4917 ± 240	6722 ± 584	6472 ± 1378
	60	1453 ± 444	4074 ± 192	3796 ± 734	6897 ± 1401	9556 ± 680	7935 ± 1674
	90	1445 ± 380	4583 ± 625	5111 ± 766	8098 ± 1306	11167 ± 1014	10958 ± 1483
URS 21	0	799 ± 134	2160 ± 959	3438 ± 1024	3479 ± 292	5007 ± 1215	4852 ± 428
	30	862 ± 238	4042 ± 755	4181 ± 299	5209 ± 755	9625 ± 2067	9472 ± 1887
	60	1326 ± 265	4097 ± 1135	4806 ± 695	6868 ± 1592	9361 ± 2454	10938 ± 1233
	90	1308 ± 205	5037 ± 645	4451 ± 231	7760 ± 758	12204 ± 966	9736 ± 1049

- Dados não coletados.

TABELA 7. Médias e intervalos de confiança (95%) dos parâmetros rendimento de grãos (RDM), estatura de plantas (EST), número de grãos por panícula (NGP), massa de mil grãos (MMG) e relação entre massa seca reprodutiva e massa seca total na colheita (RRT), de cinco genótipos de aveia-branca, sob quatro doses de adubação nitrogenada. EEA/UFRRS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

Genótipo	Dose N	RDM (kg ha ⁻¹)	EST (cm)	NGP (n°)	MMG (g)	RRT (%)
URS Altiva	0	2195 ± 213	102 ± 7,6	40 ± 8	33 ± 1,21	42 ± 1,22
	30	2988 ± 316	119 ± 5,5	42 ± 7	35 ± 0,80	39 ± 0,82
	60	3936 ± 326	132 ± 4,7	44 ± 10	34 ± 1,45	38 ± 1,56
	90	4363 ± 161	137 ± 7,2	40 ± 10	34 ± 0,44	37 ± 1,02
URS Corona	0	2425 ± 423	100 ± 1,5	60 ± 4	31 ± 0,82	55 ± 1,47
	30	3178 ± 270	111 ± 4,0	76 ± 10	31 ± 0,33	55 ± 1,50
	60	4310 ± 841	120 ± 2,7	59 ± 10	31 ± 0,71	51 ± 0,88
	90	5151 ± 469	124 ± 3,5	80 ± 18	30 ± 1,92	53 ± 1,17
URS F Flete	0	1650 ± 379	110 ± 9,4	-	-	-
	30	1893 ± 239	121 ± 8,4	-	-	-
	60	2405 ± 176	130 ± 1,8	-	-	-
	90	3041 ± 632	131 ± 6,9	-	-	-
URS Taura	0	2803 ± 354	91 ± 5,7	44 ± 11	28 ± 3,25	47 ± 2,85
	30	3432 ± 374	93 ± 6,1	43 ± 14	29 ± 1,50	48 ± 2,36
	60	4642 ± 787	107 ± 1,3	54 ± 12	31 ± 2,98	48 ± 3,12
	90	5793 ± 824	116 ± 5,6	67 ± 8	32 ± 0,91	47 ± 0,67
URS 21	0	2462 ± 174	107 ± 13,3	56 ± 10	26 ± 1,16	51 ± 1,12
	30	3748 ± 318	115 ± 6,0	67 ± 21	27 ± 2,37	45 ± 6,44
	60	4813 ± 563	130 ± 8,9	65 ± 13	26 ± 1,33	44 ± 3,24
	90	5128 ± 636	130 ± 8,3	72 ± 15	26 ± 4,80	46 ± 3,01

- Dados não coletados.

TABELA 8. Médias e intervalos de confiança (95%) dos parâmetros teor de nitrogênio no grão (TNG), teor de fósforo no grão (TPG), teor de nitrogênio acumulado no grão (NAG), fósforo acumulado no grão (PAG), número de folhas verdes no estádio de florescimento (FVFL) e número de folhas verdes no estádio de massa mole do grão (FVMM) de cinco genótipos de aveia-branca, sob quatro doses de adubação nitrogenada. EEA/UFRRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

Genótipo	Dose	TNG (%)	TPG (%)	NAG (kg ha ⁻¹)	PAG (kg ha ⁻¹)	FVFL (n°)	FVMM (n°)
URS Altiva	0	4,33 ± 0,4	1,22 ± 0,2	95 ± 5,3	26 ± 8,2	4,00 ± 0,68	1,85 ± 0,49
	30	4,16 ± 0,9	1,15 ± 0,4	126 ± 38,4	34 ± 13,6	4,00 ± 0,52	2,53 ± 0,23
	60	3,66 ± 0,7	1,20 ± 0,4	146 ± 22,8	50 ± 32,8	4,35 ± 0,29	3,07 ± 0,41
	90	3,86 ± 0,4	1,03 ± 0,7	168 ± 17,4	45 ± 15,1	4,53 ± 0,30	2,73 ± 0,11
URS Corona	0	3,99 ± 0,1	1,01 ± 0,1	97 ± 18,8	25 ± 6,7	3,87 ± 0,69	1,33 ± 0,41
	30	3,49 ± 0,3	1,09 ± 0,1	111 ± 14,3	34 ± 3,0	3,90 ± 0,49	1,40 ± 0,90
	60	3,68 ± 0,5	0,82 ± 0,2	161 ± 53,6	35 ± 8,0	4,27 ± 0,11	1,53 ± 0,97
	90	3,80 ± 0,2	0,93 ± 0,1	196 ± 18,8	47 ± 10,5	4,65 ± 0,33	1,15 ± 0,76
URS F Flete	0	3,54 ± 0,5	1,35 ± 0,2	61 ± 23,4	21 ± 5,4	3,87 ± 0,69	1,53 ± 0,30
	30	3,42 ± 0,7	1,10 ± 0,3	64 ± 13,1	21 ± 5,3	3,87 ± 0,60	1,07 ± 0,41
	60	3,86 ± 0,5	0,91 ± 0,3	93 ± 16,4	22 ± 7,7	4,15 ± 0,56	0,80 ± 0,32
	90	3,72 ± 0,2	1,05 ± 0,3	116 ± 20,2	26 ± 7,7	4,13 ± 0,25	0,80 ± 0,36
URS Taura	0	4,52 ± 0,5	0,98 ± 0,2	126 ± 13,3	28 ± 16,3	3,85 ± 0,41	1,87 ± 1,28
	30	4,03 ± 0,6	1,35 ± 0,6	139 ± 29,8	46 ± 12,7	4,47 ± 0,19	1,70 ± 0,72
	60	3,93 ± 0,5	1,06 ± 0,4	178 ± 53,7	54 ± 34,1	4,47 ± 0,30	1,27 ± 0,97
	90	4,15 ± 0,2	0,90 ± 0,6	225 ± 14,3	48 ± 3,2	4,00 ± 0,30	1,85 ± 0,94
URS 21	0	3,56 ± 0,2	1,25 ± 0,1	88 ± 8,4	31 ± 9,0	4,00 ± 0,28	0,90 ± 0,67
	30	3,38 ± 0,3	1,08 ± 0,3	126 ± 11,3	41 ± 17,0	4,65 ± 0,19	1,15 ± 0,52
	60	3,68 ± 0,1	0,89 ± 0,4	177 ± 17,4	47 ± 7,5	4,55 ± 0,33	0,85 ± 0,33
	90	3,73 ± 0,3	0,99 ± 0,2	190 ± 19,9	51 ± 11,6	4,69 ± 0,25	1,40 ± 1,19

TABELA 9. Médias e intervalos de confiança (95%) do teor de nitrogênio no tecido vegetativo (%) nos estádios fenológicos de seis folhas completamente expandidas (TNSF), alongamento de entrenós (TNAE), florescimento (TNFL), massa mole do grão (TNMM) e colheita (TNCO) de cinco genótipos de aveia-branca, sob quatro doses de adubação nitrogenada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

Genótipo	Dose	TNSF	TNAE	TNFL	TNMM	TNCO
URS Altiva	0	3,38 ± 0,95	3,04 ± 0,16	1,80 ± 0,38	1,11 ± 0,32	0,78 ± 0,17
	30	4,14 ± 0,68	3,27 ± 0,70	1,98 ± 0,24	1,08 ± 0,23	0,76 ± 0,14
	60	4,71 ± 0,75	3,82 ± 0,44	1,93 ± 0,20	1,05 ± 0,17	0,75 ± 0,17
	90	4,39 ± 0,57	4,34 ± 0,23	2,36 ± 0,37	1,22 ± 0,22	0,72 ± 0,14
URS Corona	0	3,09 ± 0,80	2,95 ± 0,29	2,35 ± 0,65	1,18 ± 0,25	0,69 ± 0,11
	30	4,56 ± 0,89	3,69 ± 0,88	1,89 ± 0,25	0,84 ± 0,20	0,68 ± 0,20
	60	4,68 ± 0,73	3,33 ± 0,50	2,05 ± 0,30	1,07 ± 0,19	0,45 ± 0,43
	90	4,48 ± 0,72	4,14 ± 0,88	2,54 ± 0,32	1,10 ± 0,23	0,69 ± 0,16
URS F Flete	0	3,86 ± 1,07	2,54 ± 0,24	2,03 ± 0,23	1,43 ± 0,39	-
	30	4,73 ± 0,50	2,12 ± 0,41	1,87 ± 0,14	1,22 ± 0,66	-
	60	4,99 ± 2,26	2,21 ± 0,30	2,41 ± 0,47	0,91 ± 0,51	-
	90	6,00 ± 1,53	2,98 ± 0,32	2,24 ± 0,56	1,06 ± 0,09	-
URS Taura	0	2,58 ± 0,40	2,39 ± 0,30	2,11 ± 0,12	1,21 ± 0,68	0,91 ± 0,31
	30	3,60 ± 0,91	3,98 ± 1,10	2,03 ± 0,41	1,02 ± 0,22	0,66 ± 0,18
	60	3,52 ± 0,51	2,91 ± 0,69	2,37 ± 0,35	1,08 ± 0,37	0,62 ± 0,02
	90	4,28 ± 0,32	3,89 ± 0,74	2,59 ± 0,48	1,11 ± 0,17	0,76 ± 0,15
URS 21	0	2,70 ± 0,75	2,43 ± 0,37	1,90 ± 0,50	1,18 ± 0,50	0,75 ± 0,09
	30	4,10 ± 1,33	3,52 ± 0,64	1,85 ± 0,24	1,13 ± 0,14	0,85 ± 0,14
	60	5,01 ± 0,70	3,45 ± 0,84	1,98 ± 0,48	0,95 ± 0,51	0,67 ± 0,08
	90	5,36 ± 0,47	3,99 ± 0,41	2,20 ± 0,38	1,02 ± 0,12	0,90 ± 0,34

- Dados não coletados.

TABELA 10. Médias e intervalos de confiança (95%) da quantidade de nitrogênio acumulada no tecido vegetativo (kg ha^{-1}) nos estádios fenológicos de seis folhas completamente expandidas (NASF), alongamento de entrenós (NAAE), florescimento (NAFL), massa mole do grão (NAMM) e colheita (NACO) de cinco genótipos de aveia-branca, sob quatro doses de adubação nitrogenada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2018.

Genótipo	Dose	NASF	NAAE	NAFL	NAMM	NACO
URS Altiva	0	40 ± 19	61 ± 9	55 ± 17	39 ± 13	19 ± 6
	30	61 ± 14	104 ± 18	95 ± 22	56 ± 18	31 ± 13
	60	71 ± 16	116 ± 17	116 ± 22	76 ± 12	46 ± 14
	90	69 ± 4	198 ± 21	175 ± 11	110 ± 19	40 ± 10
URS Corona	0	42 ± 17	62 ± 10	91 ± 23	45 ± 15	19 ± 6
	30	58 ± 14	120 ± 49	84 ± 15	38 ± 5	26 ± 8
	60	62 ± 15	114 ± 21	120 ± 14	58 ± 8	20 ± 19
	90	66 ± 22	173 ± 47	141 ± 16	58 ± 12	32 ± 8
URS F Flete	0	24 ± 9	71 ± 19	64 ± 5	44 ± 17	-
	30	36 ± 14	83 ± 19	86 ± 16	52 ± 31	-
	60	36 ± 14	111 ± 18	111 ± 22	44 ± 24	-
	90	46 ± 6	149 ± 23	144 ± 47	62 ± 18	-
URS Taura	0	28	68 ± 3	59 ± 8	25 ± 28	15 ± 2
	30	49 ± 11	95 ± 33	76 ± 12	41 ± 8	23 ± 11
	60	50 ± 6	87 ± 27	128 ± 22	60 ± 26	26 ± 6
	90	87 ± 23	146 ± 48	168 ± 15	73 ± 14	44 ± 8
URS 21	0	28 ± 8	58 ± 13	51 ± 13	33 ± 16	18 ± 1
	30	42 ± 9	96 ± 23	80 ± 15	63 ± 15	41 ± 10
	60	57 ± 22	106 ± 43	113 ± 52	49 ± 30	39 ± 9
	90	60 ± 13	131 ± 14	143 ± 34	73 ± 9	48 ± 27

- Dados não coletados.

5.1 Discussão

A adubação nitrogenada incrementou o crescimento da planta, aumentando a massa seca vegetativa, permitindo a produção de maior número de grãos por panícula e, conseqüentemente, maior rendimento de grãos (Tabela 5; Tabela 7). O aparato fotossintético é o maior dreno de nitrogênio em plantas, sendo que a capacidade fotossintética da folha é positivamente correlacionada com o teor de N foliar (Poorter, 1998). Então, plantas bem nutridas em nitrogênio apresentam maior potencial de crescimento e rendimento, por possuírem maior capacidade fotossintética (Yao *et al.*, 2015; Yin *et al.*, 2019). De fato, as maiores doses de adubação elevaram os teores de nitrogênio no tecido vegetativo, aumentando a massa seca acumulada e o rendimento de grãos (Tabela 9). Em decorrência do aumento da massa seca da planta e da disponibilidade de nitrogênio, maiores doses de nitrogênio resultaram em maiores quantidades de nitrogênio acumulado na planta (Tabela 10).

A disponibilidade de nitrogênio pode estender a duração da área foliar verde, atrasando a senescência e possibilitando o aumento de rendimento de grãos (Gregersen *et al.*, 2013). Além disto, nutrientes estruturais (particularmente o nitrogênio) podem ser parcialmente reciclados durante a senescência para o enchimento dos grãos (Gregersen *et al.*, 2013). Portanto, espera-se que plantas que possuam maior aporte de nitrogênio em seu tecido apresentem maior capacidade de enchimento de grãos. Por este motivo, possivelmente a maior quantidade de nitrogênio acumulado em tecido vegetativo em maiores doses de nitrogênio, permite o maior rendimento de grãos. Constatou-se que os genótipos aumentaram a força de dreno nas maiores doses, aumentando o número de grãos por panícula, uma vez que não foram encontradas diferenças a respeito da massa dos grãos e teor de nitrogênio no grão, mas sim para número de grãos por panícula

e nitrogênio acumulado no grão (Tabela 7; Tabela 8). Mas mesmo a maior dose de nitrogênio não apresentando efeito sobre a massa dos grãos, como houve aumento no número de grãos foi necessário elevar a massa seca vegetativa acumulada para servir de fonte para o maior dreno criado (Tabela 5). Além da maior disponibilidade de fotoassimilados para translocação, possivelmente houve maior capacidade da planta realizar fotossíntese durante o enchimento de grãos, uma vez que foram observados maiores teores de nitrogênio e maior quantidades de nitrogênio acumulado no tecido vegetativo (Tabela 9; Tabela 10).

O número de perfilhos produtivos por planta é outro fator que pode atuar na formação do maior rendimento de grãos. Perfilhos são ramificações laterais que se desenvolvem a partir de gemas axilares dos nós que se localizam abaixo da superfície do solo (Sangoi *et al.*, 2007). Estes são morfologicamente idênticos ao colmo principal e são importantes para os cereais de inverno, pois participam dos componentes do rendimento e suprem fotoassimilados ao colmo principal (Almeida & Mundstock, 2001; Sangoi *et al.*, 2007).

Os perfilhos normalmente apresentam pequena participação na formação do rendimento final nas menores doses de nitrogênio, por conta da baixa sobrevivência ou produção de perfilhos inférteis (Almeida *et al.*, 2003). Nesse contexto, plantas melhor nutridas com nitrogênio podem elevar o rendimento de grãos por atuarem na manutenção de perfilhos férteis (Sangoi *et al.*, 2007). Ainda, se os perfilhos não forem produtivos, uma maior quantidade de perfilhos pode atuar como reserva de fotoassimilados que, posteriormente servirá como fonte para o enchimento de grãos (Gregersen *et al.*, 2013). Como já mencionado, plantas que acumulam maiores quantidades de massa seca na fase vegetativa, tendem a apresentar maiores rendimentos de grãos. Contudo, esta situação somente é válida para um mesmo

genótipo, pois URS Taura emite menor número de perfilhos que URS F Flete (dados não apresentados), mas possui maior rendimento de grãos.

A massa seca produzida é determinada em função da interceptação da luz e da eficiência no uso da radiação (Reynolds *et al.*, 2012). A interceptação da luz pode ser incrementada pela otimização do tamanho do dossel (folhas grandes e numerosas), pela arquitetura (folhas eretas) e longevidade (vigor precoce e senescência tardia), enquanto um incremento de fotossíntese é necessário para elevar a eficiência no uso da radiação (Reynolds *et al.*, 2012). No entanto, maior quantidade de massa seca produzida só resulta em maior rendimento de grãos quando para um mesmo genótipo (Tabela 5; Tabela 7). A relação entre a massa seca reprodutiva e massa seca total é uma variável que resume a capacidade de remobilização e, portanto, a eficiência no uso da massa seca acumulada na produção de grãos (Tabela 7). No entanto, a relação entre a massa seca reprodutiva e massa seca total não apresentou relação com o rendimento de grãos, apesar de reduzir com o aumento da dose nitrogenada.

A massa seca acumulada pela planta no período pré-antese tem sido destacada como determinante do rendimento final de grãos (Xie *et al.*, 2016). Isto pode ser explicado pelo fato de que plantas com maior massa seca podem apresentar maior área fotossintética para produção de carboidratos, bem como panículas maiores e grãos de maior massa (Boukerrou & Rasmusson, 1990; Xie *et al.*, 2016), além de terem maior arcabouço para resistência a estresses. Corroborando estas informações, os genótipos apresentaram maiores rendimentos de grãos nas doses de adubação nitrogenada que proporcionaram maiores massa seca acumulada no estágio fenológico de florescimento (Tabela 5; Tabela 7). O coeficiente de correlação entre a massa seca vegetativa no florescimento o rendimento de grãos é de 0,74, sendo que quando retirado o genótipo URS F Flete

da análise o coeficiente de correlação aumenta para 0,84. Contudo, por conta das diferenças na relação entre a massa seca reprodutiva e massa seca total, essa característica é dependente de genótipo, pois genótipos que apresentaram maiores massas secas vegetativa nem sempre obtiveram grandes rendimentos de grãos.

A quantidade de massa seca sintetizada entre a antese e a maturidade depende do momento de senescência da planta, sendo a senescência tardia considerada favorável ao rendimento de grãos (Gregersen *et al.*, 2013). Folhas que permanecem por um período maior de tempo fotossinteticamente ativas, são uma das razões do alto potencial produtivo de cultivares modernas de cereais (Welch, 1995). Isto porque, além da remobilização, os assimilados produzidos pela fotossíntese durante o enchimento de grãos também atuam na definição da massa de grãos (Xie *et al.*, 2016), logo se a fotossíntese se mantém ativa por um período maior de tempo, há a probabilidade de se obter maior rendimento de grãos. De fato, os genótipos quando em maiores doses de nitrogênio, apresentaram maior quantidade de massa seca (Tabela 5) e maior quantidade de nitrogênio acumulado (Tabela 10) e necessitaram de maior período de tempo para senescerem, conforme indicam os perfis temporais do NDVI (Figura 2; Figura 3; Figura 4; Figura 5; Figura 6). Isto é confirmado pelo maior número de folhas verdes, no estágio de massa mole do grão, nas maiores doses de nitrogênio (Tabela 17).

O perfil temporal do NDVI acompanhou o crescimento da planta, apresentando diferentes valores conforme a dose de nitrogênio (Figura 2; Figura 3; Figura 4; Figura 5; Figura 6). Contudo, o índice de vegetação sempre encontrou um valor de saturação, onde o seu valor não sofria alteração mesmo elevando a quantidade de massa seca acumulada. Interessantemente, os genótipos apresentaram valores de saturação distintos conforme a dose, mesmo o valor de massa seca sendo semelhante ao da dose superior em outro estágio fenológico.

Por exemplo, o genótipo URS Taura na dose de 0 e 30 kg ha⁻¹ de N apresentou saturação do NDVI próximo de 0,60, enquanto na dose de 60 kg ha⁻¹ de N o valor de saturação do NDVI ocorreu ao redor de 0,67 e aumentou para 0,77 na dose de 90 kg ha⁻¹.

O valor de saturação encontrado na dose de 60 kg ha⁻¹ de N, 0,67, ocorre próximo ao estágio de seis folhas completamente expandidas na dose de 90 kg ha⁻¹ de N, que apresentou 2042 kg de massa seca ha⁻¹. No entanto, esse valor de NDVI na dose de 60 kg ha⁻¹ de N representa o intervalo entre o alongamento de entrenós e florescimento, que possui variação de 3007 a 5455 kg de massa seca ha⁻¹ (Tabela 5). Logo, um mesmo NDVI pode apresentar saturações em valores diferentes e estes podem representar diversos valores de massa seca acumulada. Isto pode estar relacionado com alterações na estrutura foliar, bem como no teor de nitrogênio no tecido vegetativo, que são os componentes que atuam na reflectância nos comprimentos de faixa espectral utilizados (Campbell *et al.*, 2008; Moreira, 2011). Por este motivo, o valor de NDVI deve estar sempre acompanhado do estágio fenológico, bem como quando utilizado para inferências de massa seca as condições de cultivo, como a adubação nitrogenada, devem ser as mesmas.

5.2 Conclusões

Maiores doses de nitrogênio resultam em maior acúmulo de massa seca vegetativa com maiores teores de nitrogênio foliar, possibilitando maior área foliar com possível maior capacidade fotossintética. Ainda, a senescência foliar é retardada, permitindo que a fotossíntese fixe carbono por maior período de tempo, disponibilizando maior quantidade de fotoassimilados destinados à remobilização para o grão. Essas condições resultam em maiores rendimentos de grãos, no entanto devem ser observadas para um mesmo genótipo. Quando observado entre

genótipos isto não ocorre, por conta das diferenças de capacidade de acúmulo e partição de fotoassimilados para o grão.

O perfil temporal do NDVI acompanha o crescimento da planta, porém a saturação do índice limita a qualidade da informação. Interessantemente, a saturação do índice de vegetação ocorre em valores diferentes conforme a dose de adubação nitrogenada e pode se estender por mais de um estágio fenológico, representando grandes diferenças em massa seca acumulada. Logo, os valores de NDVI devem estar acompanhados da adubação nitrogenada aplicada e do estágio fenológico de leitura.

5.3 Referências bibliográficas

ALMEIDA, M. L. De et al. Tillering does not interfere on white oat grain yield response to plant density. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 2, p. 253-258, 2003.

ALMEIDA, M. L. De; MUNDSTOCK, C. M. O afilhamento da aveia afetado pela qualidade da luz em plantas sob competição. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 393-400, 2001.

BOUKERROU, L.; RASMUSSEN, D. D. Breeding for High Biomass Yield in Spring Barley. **Crop Science**, Madison, v. 30, n. 1, p. 31, 1990.

CAMPBELL, P. K. E. et al. Contribution of chlorophyll fluorescence to the apparent vegetation reflectance. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 404, n. 2-3, p. 433-439, 2008.

DUAN, T. et al. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 210, n. 1 p. 71-80, 2017.

GREGERSEN, P. L. et al. Plant senescence and crop productivity. **Plant Molecular Biology**, Dordrecht, v. 82, n. 6, p. 603-622, 2013.

HASSAN, M. A. et al. A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform. **Plant Science**, London, v. 282, v. 5, 2018.

IPAGRO. **Observações meteorológicas no estado do Rio Grande do Sul**. 3. ed. Porto Alegre: IPAGRO, 1979. 271 p.

MAGNEY, T. S. et al. Proximal NDVI derived phenology improves in-season predictions of wheat quantity and quality. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 217, p. 46–60, 2016.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2011. 422 p.

POORTER, H. Photosynthetic nitrogen-use efficiency of species that differ inherently in specific leaf area. **Growth**, Lakeland, p. 26-37, 1998.

REYNOLDS, M. et al. Achieving yield gains in wheat. **Plant Cell and Environment**, Malden, v. 35, n. 10, p. 1799-1823, 2012.

SANGOI, L. et al. Características agronômicas de cultivares de trigo em resposta à época da adubação nitrogenada de cobertura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 6, p. 1564-1570, 2007.

SHAKOOR, N.; LEE, S.; MOCKLER, T. C. High throughput phenotyping to accelerate crop breeding and monitoring of diseases in the field. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 38, p. 184-192, 2017.

SMITH, H. L.; MCAUSLAND, L.; MURCHIE, E. H. Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 68, n. 9, p. 2099–2110, 2017.

STRECK, E. V; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. C. D. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222 p.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p.

VIAN, A. L. et al. Nitrogen management in wheat based on the normalized difference vegetation index (NDVI). **Ciência rural**, Santa Maria, v. 48, n. 09, p. 1–9, 2018.

WELCH, R. W (Ed.). **The oat crop**: production and utilization. London: Chapman & Hall, 1995. 584p.

XIE, Q.; MAYES, S.; SPARKES, D. L. Preanthesis biomass accumulation of plant and plant organs defines yield components in wheat. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 81, p. 15-26, 2016.

YIN, L. et al. Optimised nitrogen allocation favours improvement in canopy photosynthetic nitrogen-use efficiency: Evidence from late-sown winter wheat. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford v. 159, n. 12, p. 75-86, 2019.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A massa seca vegetativa acumulada é importante para o rendimento de grãos, sendo que quanto maior a massa seca vegetativa acumulada no florescimento, maior será o rendimento de grãos. No entanto, genótipos que produzem menor massa seca podem apresentar maiores rendimentos de grãos do que genótipos que produzem altas quantidades de massa seca. Essa condição está relacionada com a capacidade de partição da massa seca vegetativa em reprodutiva que o genótipo possui. URS Altiva foi o genótipo que apresentou maior massa seca acumulada no florescimento, porém seu rendimento de grãos foi inferior a URS Taura, sendo explicado pela maior capacidade de partição desse.

URS Altiva apesar de possuir alta quantidade de fonte, evidenciada pela alta produção de massa seca vegetativa, o seu rendimento de grãos foi próximo de URS F Flete, que é o genótipo de menor potencial produtivo utilizado nos ensaios experimentais. Tal fato está relacionado com o baixo número de grãos por panícula que URS Altiva apresenta. Por possuir alta quantidade de tecido fonte (massa seca vegetativa), mas pouco tecido dreno (grãos) esse genótipo apresenta elevada massa de grãos.

URS F Flete apresenta padrão de senescência foliar distinto dos demais genótipos. Para estes quanto maior é a duração da área foliar durante o acúmulo de massa seca, maior é o rendimento de grãos. No entanto, para URS F Flete, o rendimento de grãos é maior quando a senescência foliar ocorre de forma rápida e precoce.

O comportamento de acúmulo de massa segue uma curva do tipo sigmoide, onde o início e o fim apresentam baixas taxas de acúmulo de massa seca. O parâmetro taxa de acúmulo de massa seca apresenta maior importância da definição da massa final do grão do que a duração do acúmulo. Havendo baixa variabilidade para o segundo caráter entre as cultivares de aveia branca. Por conseguinte, a diferença existente entre os genótipos para os parâmetros de massa seca, nitrogênio e fósforo acumulado são explicados pela taxa de acúmulo.

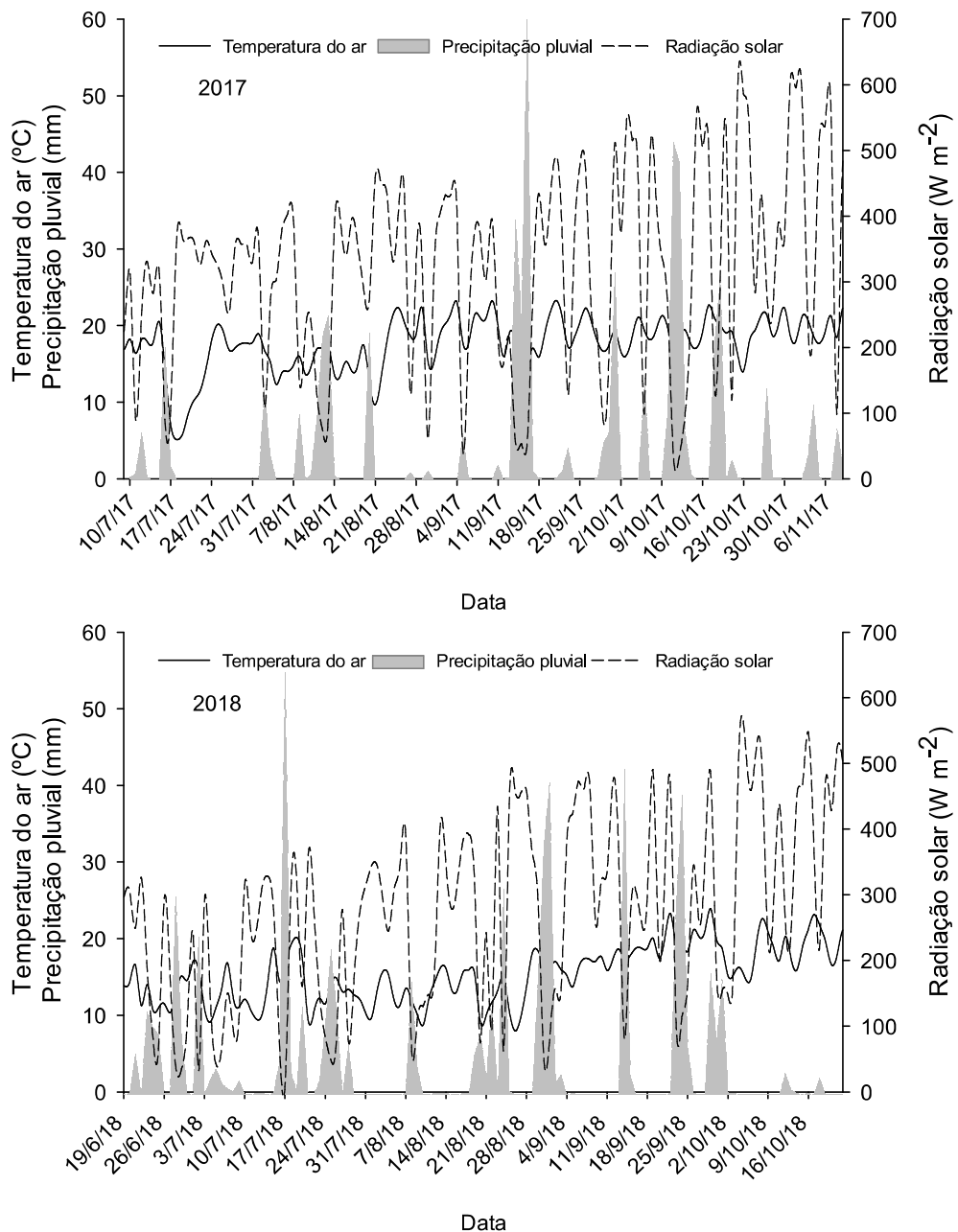
O acúmulo de massa seca sofre interferência de fatores como nitrogênio e condições ambientais. No entanto, são afetados apenas características do padrão de acúmulo, mas não a massa final individual do grão. Condições ambientais que promovem maior acúmulo de massa seca no período vegetativo reduzem a duração efetiva de acúmulo de massa seca no grão, por acelerar a senescência foliar. A dose de nitrogênio modifica a duração efetiva de acúmulo de massa, reduzindo-a em maiores doses. Conseqüentemente, ocorre incremento na taxa média de acúmulo. Como o rendimento de grãos é reduzido em menores doses de nitrogênio, mas a massa do grão não é modificada, ocorre redução no número de grãos por panícula. Isso possivelmente ocorre de acordo com o equilíbrio entre fonte e dreno.

Os índices NDVI e IOP foram capazes de perceber o aumento da dose nitrogenada, mas o índice SPAD não. Quanto maior o valor de NDVI e IOP maior é a massa seca da parte aérea e o rendimento de grãos. Mas suas informações devem ser observadas em conjunto com fatores como genótipo, condições ambientais, dose nitrogenada aplicada e estágio de desenvolvimento que foi realizada a leitura. Por conta disto, a aplicação do NDVI para a predição de rendimento de grãos e massa seca da parte aérea não se apresentou eficiente. Possivelmente, o uso de modelos mais específicos e que incluam informações de

mais de um ano possam melhorar as predições por intermédio desse índice de vegetação.

O perfil de NDVI acompanha a dinâmica de crescimento das plantas de aveia branca, porém apresenta limitações. É possível verificar os momentos de início de acúmulo de massa e de senescência foliar. No entanto, nos estádios que apresentam maiores massas secas verdes, entre o alongamento de entrenós e florescimento, o índice é limitado por sua saturação. Dessa forma, um mesmo valor de NDVI pode refletir a diferentes massas secas. Logo, os índices vegetativos apresentaram potenciais usos para a cultura, mas devem ser utilizados com cautela.

7 APÊNDICES



APÊNDICE 1. Temperatura média diária do ar, precipitação pluvial e radiação solar média diária observados no período de condução dos ensaios experimentos das safras 2017 e 2018. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2017 e 2018.

APÊNDICE 2. Data de florescimento, data de coleta de panículas e dias após o florescimento que foi realizado coleta de panícula dos sete genótipos avaliados na safra 2017.

Genótipo	Parâmetro	Florescimento	Coleta de panícula						
			1ª	2º	3º	4º	5º	6º	7º
URS Altiva	DAF	0	7	10	13	17	21	24	28
	Data	29/8	5/9	8/9	11/9	15/9	19/9	22/9	26/9
URS Corona	DAF	0	5	9	13	16	20	23	27
	Data	6/9	11/9	15/9	19/9	22/9	26/9	29/9	3/10
URS F Flete	DAF	0	13	16	20	27	33	37	41
	Data	13/9	26/9	29/9	3/10	10/10	16/10	20/10	24/10
URS Taura	DAF	0	8	12	16	19	23	26	30
	Data	3/9	11/9	15/9	19/9	22/9	26/9	29/9	3/10
UFRGS 137117-2	DAF	0	11	14	17	21	25	28	32
	Data	25/8	5/9	8/9	11/9	15/9	19/9	22/9	26/9
UFRGS 146155-3	DAF	0	11	14	18	22	25	29	32
	Data	28/8	8/9	11/9	15/9	19/9	22/9	26/9	29/9
UFRGS 146173-1	DAF	0	8	11	15	19	22	26	29
	Data	31/8	8/9	11/9	15/9	19/9	22/9	26/9	29/9

APÊNDICE 3. Data de florescimento, data de coleta de panículas e dias após o florescimento que foi realizado coleta de panícula dos tratamentos avaliados na safra 2018.

Tratamento	Parâmetro	Florescimento	Coleta de panícula						
			1ª	2º	3º	4º	5º	6º	7º
URS Altiva	DAF	0	7	11	13	17	20	23	26
0 kg de N ha ⁻¹	Data	26/9	3/10	7/10	9/10	13/10	16/10	19/10	22/10
URS Altiva	DAF	0	11	15	19	21	25	28	31
30 kg de N ha ⁻¹	Data	18/9	29/9	3/10	7/10	9/10	13/10	16/10	19/10
URS Altiva	DAF	0	11	15	19	21	25	28	31
60 kg de N ha ⁻¹	Data	18/9	29/9	3/10	7/10	9/10	13/10	16/10	19/10
URS Altiva	DAF	0	11	15	19	21	25	28	31
90 kg de N ha ⁻¹	Data	18/9	29/9	3/10	7/10	9/10	13/10	16/10	19/10

APÊNDICE 4. Programação realizada para obtenção dos parâmetros da equação de Weibull no software SAS.

```

data Enchimento;
input t gp gs;
*/ t = Dias após o florescimento - variável independente
   gp = Massa individual do grão primário - variável dependente
   gs = Massa individual do grão secundário - variável dependente /*;
datalines;
*/dados/*.....
;
title 'Grao Primario';
PROC NLIN BEST=10 METHOD=MARQUARDT DATA=Enchimento HOUGAARD
NOITPRINT PLOTS=fit PLOTS(stats=all) ;
PARMS f=0 TO 60 BY 1 d=0 TO 40 BY 1 a=0 to 1 by .1 b=0 to 5 by 1;
MODEL gp = F-(D)*exp(-a*(t**b));
OUTPUT OUT=B1 P=PRED R=RESID sse=sse ;
PROC PRINT DATA=B1;
RUN;
PROC MEANS DATA=Enchimento NOPRINT CSS;
VAR gp;
OUTPUT OUT=B2 CSS=CSS;
RUN;
DATA _null_;
SET B1(OBS=1); SET B2(OBS=1);
RSQ = 1 - SSE/CSS;
FILE PRINT;
put // +10 'R-square for the non-linear model is defined as 1 - SSE/CSS. where sse is
the variance of' /
      +10 'of the full model. CSS is the variance of the mean model. ' //
      +10 'R-square =' +5 rsq 8.6;
RUN;
QUIT;
title 'Grao Secundário';
PROC NLIN BEST=10 METHOD=MARQUARDT DATA=Enchimento HOUGAARD
NOITPRINT PLOTS=fit PLOTS(stats=all) ;
PARMS f=0 TO 60 BY 1 d=0 TO 40 BY 1 a=0 to 1 by .1 b=0 to 5 by 1;
MODEL gs = F-(D)*exp(-a*(t**b));
OUTPUT OUT=B1 P=PRED R=RESID sse=sse ;
PROC PRINT DATA=B1;
RUN;
PROC MEANS DATA=Enchimento NOPRINT CSS;
VAR gs;
OUTPUT OUT=B2 CSS=CSS;
RUN;
DATA _null_;
SET B1(OBS=1); SET B2(OBS=1);
RSQ = 1 - SSE/CSS;
FILE PRINT;
put // +10 'R-square for the non-linear model is defined as 1 - SSE/CSS. where sse is
the variance of' /
      +10 'of the full model. CSS is the variance of the mean model. ' //
      +10 'R-square =' +5 rsq 8.6;
RUN;
QUIT;

```

APÊNDICE 5. Programação em linguagem C++ para obtenção dos parâmetros de comportamento de enchimento de grão a partir de uma curva Weibull.

```
#include "stdafx.h"
#include <iostream>
#include <cmath>

constexpr double MAXVALUE          = 60.0;
constexpr double MINTESTVALUE     = 0.000001;
constexpr double MAXTESTVALUE     = 0.01;
constexpr double VARTESTVALUE     = 10;

double Function(double IndependVar);

int main()
{
    double x = 0.0, XInit = 0.0, XEnd = 0.0, dx = 0.001, Test = 0.0, TestValue
= 0.001;
    // allocate all variables
    double F = 0.0, F_Old0 = 0.0, F_Old1 = 0.0, F_FinalValue =
Function(MAXVALUE), F_InitialValue = Function(0.0), FInit = 0.0, FEnd = 0.0,
Aux = 0.0;
    double MaxGrowth[3];
    bool IsThisFirstValueStart = false, IsThisFirstValueEnd = false;

    // loop --> calc. numeric diff
    for (x = 0.0; x <= MAXVALUE; x = x + dx)
    {
        // Check for max min
        if (x != 0.0) F_Old1 = F_Old0;
        F_Old0 = F;
        F = Function(x);
        Test = (F - F_Old0);
        // print x where dy/dx < Test Value
        if (Test <= TestValue &&
            x != 0 + TestValue &&
            F_Old0 != 0.0 &&
            F_Old1 != 0.0 &&
            F <= ((F_FinalValue-F_InitialValue)*0.05+F_InitialValue) &&
            F >= ((F_FinalValue - F_InitialValue)*0.04+F_InitialValue)
&&
            IsThisFirstValueStart == false)
        {
            std::cout << "Start Growth: (day - " << rint(x) << " ; mass - "
<< F << ")" << std::endl;
            IsThisFirstValueStart = true;
            XInit = x;
            FInit = F;
        }
        if (Test <= TestValue &&
            x != 0 + TestValue &&
```



```

        F_Old0 != 0.0 &&
        F_Old1 != 0.0 &&
        F >= F_FinalValue * 0.95 &&
        F <= F_FinalValue * 0.96 &&
        IsThisFirstValueEnd == false)
    {
        std::cout << "End Growth: (day - " << rint(x) << " ; mass -
"<< F << ")" << std::endl;
        IsThisFirstValueEnd = true;
        XEnd = x;
        FEnd = F;
    }
    if ( (F - F_Old0) > (F_Old0 - F_Old1) && Test > TestValue)
    {
        MaxGrowth[0] = rint(x);
        MaxGrowth[1] = Function(rint(x+1));
        MaxGrowth[2] = Function(rint(x));
    }
}
Aux = (FEnd-FInit) / (XEnd-XInit);
std::cout << std::endl;
std::cout << "Max Growth Point: (day - " << MaxGrowth[0] << " ; mass - "
<< MaxGrowth[1] << ")" << std::endl;
std::cout << "Current Epsilon: " << TestValue << " ; Max Growth Value: "
<< (MaxGrowth[1] - MaxGrowth[2]) << " ; " << std::endl << "Average Growth
Withing Limits (5%-95%): " << Aux << std::endl;

std::cout << std::endl;
return 0;
}

double Function(double IndependVar)
{
    double D = 32.4161, a= 4.22*pow(10, -6), b= 3.8832, Yf=45.3986;

    double FuncValue = Yf - D * exp(-a * pow(IndependVar, b) );
    return FuncValue;
}

```