

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DE AVEIA-BRANCA,
AVALIADO POR SENSORIAMENTO REMOTO, SOB
APLICAÇÃO DE EFLUENTE DE ESGOTO TRATADO E
NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO**

Anderson Prates Coelho

Engenheiro Agrônomo

2019

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DE AVEIA-BRANCA,
AVALIADO POR SENSORIAMENTO REMOTO, SOB
APLICAÇÃO DE EFLUENTE DE ESGOTO TRATADO E
NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO**

Discente: Anderson Prates Coelho

Orientador: Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria

Coorientadora: Profa. Dra. Carolina Fernandes

**Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,
Câmpus de Jaboticabal, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Mestre em Agronomia (Produção Vegetal)**

2019

C672d Coelho, Anderson Prates
Desempenho agrônomo de aveia-branca, avaliado por sensoriamento remoto, sob aplicação de efluente de esgoto tratado e níveis de irrigação / Anderson Prates Coelho. -- Jaboticabal, 2019
76 f. : il., tabs., 4 v. + 1 CD-ROM

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Rogério Teixeira de Faria
Coorientadora: Carolina Fernandes

1. Irrigação. 2. Irrigação com águas residuais. 3. Sensoriamento remoto. 4. Aveia. 5. Agricultura estimativa de rendimento. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DESEMPENHO AGRONÔMICO DE AVEIA-BRANCA, AVALIADO POR SENSORIAMENTO REMOTO, SOB APLICAÇÃO DE EFLUENTE DE ESGOTO TRATADO E NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO

AUTOR: ANDERSON PRATES COELHO

ORIENTADOR: ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA

COORIENTADORA: CAROLINA FERNANDES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. LUCAS RIOS DO AMARAL
UNICAMP - Campinas, SP


Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 19 de fevereiro de 2019

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ANDERSON PRATES COELHO – Filho de Juliana Prates Baião Coelho e Alecxandro Aparecido Braghini Coelho, nasceu na cidade de São Sebastião do Paraíso, Minas Gerais, no dia 06 de julho de 1994. Em março de 2012 entrou no curso de graduação de Engenharia Agrônômica na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp, Câmpus de Jaboticabal, com conclusão realizada em janeiro de 2017. Durante a graduação foi bolsista de iniciação científica pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), desenvolvendo o projeto intitulado “Irrigação Suplementar na cana-de-açúcar plantada por meio de mudas pré-brotadas”. Em março de 2017 ingressou no mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp, Câmpus de Jaboticabal, sendo bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), com conclusão realizada em fevereiro de 2019. Nos anos de 2017 e 2018, fez parte da comissão científica do Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola (CONBEA), atuando na avaliação dos trabalhos científicos. Desde janeiro de 2015 faz parte do grupo de pesquisa em irrigação e meio ambiente (GpIMA) na Unesp, Jaboticabal.

Epígrafe

“Eu sou parte de uma equipe. Então, quando venço, não sou eu apenas quem vence. De certa forma termino o trabalho de um grupo enorme de pessoas” (Ayrton Senna)

“A ciência pode purificar a religião de erros e superstições. A religião pode purificar a ciência de idolatrias e erros absolutos” (São João Paulo II)

DEDICO

A Deus pela vida. Aos meus pais, Juliana e Alecxandro, e aos meus irmãos, Bruno e Gabriela, pelo grande carinho, compreensão, incentivo e apoio nessa caminhada. A todos os meus amigos, pelos momentos que passamos juntos durante essa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e à Nossa Senhora da Conceição Aparecida, pelo dom da vida, por iluminar meu caminho nos momentos mais difíceis e por ter colocado pessoas tão especiais ao meu redor.

Aos meus pais, Juliana e Alexandre, meu eterno reconhecimento por me apoiarem nessa jornada, enfrentando juntos as dificuldades encontradas.

Aos meus irmãos, Bruno e Gabriela, pelo carinho, apoio e companheirismo.

Ao meu orientador, Rogério Teixeira de Faria, agradeço pela amizade e aprendizado durante os dois últimos anos.

A minha coorientadora, Carolina Fernandes, pela grande amizade construída, pelos ensinamentos científicos e pessoais e pelas longas conversas.

Aos professores e amigos Alexandre Barcellos Dalri e Luiz Fabiano Pallareti, agradeço pela grande amizade, aprendizado, seja ele técnico ou pessoal, além da paciência em nossas longas conversas.

Aos professores Newton La Scalla Júnior e David Luciano Rosalen, pelos ensinamentos passados e orientação durante a graduação.

Aos meus familiares paternos, em especial aos avós Efigênia e Oswaldo, tias Maria Hortênsia, Ana Maria e Maria Ignês, primos Gustavo, Valéria, Daniel, José Luiz e Jaqueline.

Aos meus padrinhos José Osmar de Paula e Fabiana, por todo apoio e carinho.

Aos meus familiares maternos, em especial aos meus avós Sebastiana e José, tios Nilson, Eliana, Júnior, Renata, Willian, José e Rodrigo.

Aos amigos(as)/irmãos Matheus Silva, Mariele Fernandes e Vinícius Filla pelas conversas, discussões, companheirismo, ajuda, apoio, aprendizado e paciência durante nosso tempo de convívio.

Aos amigos e amigas que fiz durante a graduação e mestrado na FCAV/Unesp, Willian Santos, Fábio Leal, Marcus Marin, Otávio Vilella, João Bettiol, Felipe Marques, Luiz Bertasello, Kevyn Belonsi, Marcelo Messi, Renato Barros, Almir Salvador, Victor Gibertoni, Lucas Brame, Gustavo Cansian, Estêvão Landell, Caroline Ferreira, Anieli Baldo, Larissa Souza, Tamara Ribeiro, Clara Esposti, Camila Potenza, Paloma, Bruna, Franciele Mendes, Juliana Boiago, Natália Castro, Francini Tulini e Amanda Gonçalves

pelo grande apoio, carinho e paciência, deixando os momentos de grande dificuldade menos árduos. Além disso, agradeço ao amigo Pedro Henrique de Lima (*in memoriam*) pelo grande companheirismo durante a graduação. “Eu poderia suportar, embora não sem dor, que tivessem morrido todos os meus amores, mas enlouqueceria se morressem todos os meus amigos” (Paulo Sant’Ana).

Aos companheiros do grupo de pesquisa GpIMA João Fischer, José de Arruda (Juca), Pablo, Jonathan, Thayane Alves, Antônio Michael, Geffson, Alexia, Aline Barbosa, Marcilene e Luís Libardi

Ao funcionário do departamento de engenharia rural, João Trentin, pela ajuda durante os dois anos de experimento de campo. Aos funcionários e amigos Aduino e Cláudia, do departamento de solos e adubos, pela grande ajuda nas análises e conversas durante os dois últimos anos.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) pelas contribuições na condução dos experimentos de campo.

Aos meus amigos de ensino médio Vinícius, Thales e Gustavo, pelo companheirismo, mesmo estando distantes, e pela ajuda na escolha do curso de Agronomia.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado durante os dois últimos anos e ao programa de pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) pela oportunidade concedida.

E por fim, agradeço à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, instituição composta por grandes mestres e pessoas, que me ajudaram na formação acadêmica e pessoal.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Revisão de literatura.....	4
1.2.1 Aveia-branca (<i>Avena sativa</i> L.).....	4
1.2.2 Águas residuárias na agricultura.....	6
1.2.3 Irrigação deficitária na agricultura.....	8
1.2.4 Sensoriamento Remoto.....	9
1.3 Referências.....	10
CAPÍTULO 2 - DESEMPENHO AGRONÔMICO DE AVEIA-BRANCA CULTIVADA SOB FERTIRRIGAÇÃO COM EFLUENTE DE ESGOTO TRATADO E DEFINIÇÃO DE LIMITES CRÍTICOS DE NDVI	17
RESUMO.....	17
2.1 Introdução.....	17
2.2 Material e métodos.....	19
2.3 Resultados e discussão.....	24
2.4 Conclusões.....	33
2.5 Referências.....	34
CAPÍTULO 3 - DESEMPENHO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DE AVEIA-BRANCA, CULTIVADA SOB NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO, EM FUNÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	39
RESUMO.....	39
3.1 Introdução.....	39
3.2 Material e métodos.....	41
3.3 Resultados e discussão.....	47
3.4 Conclusões.....	58
3.5 Referências.....	58
CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	64

DESEMPENHO AGRONÔMICO DE AVEIA-BRANCA, AVALIADO POR SENSORIAMENTO REMOTO, SOB APLICAÇÃO DE EFLUENTE DE ESGOTO TRATADO E NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO

RESUMO – A utilização e o reúso da água na agricultura são uma das maiores preocupações mundiais atualmente. Alternativas e práticas que otimizem esse recurso são sempre temas de debate e atenção por parte de pesquisadores e governantes. Para o aumento da eficiência e otimização do uso e reúso da água, o sensoriamento remoto de áreas agrícolas tem se mostrado excelente alternativa na definição de áreas de manejo específico. Dessa maneira, objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação de efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE) no cultivo de aveia-branca (*Avena sativa* L.), definindo-se zonas de manejo a partir de sensoriamento remoto com o índice de vegetação NDVI e avaliar a capacidade de generalização de modelos de estimativa da produtividade de aveia-branca em função de índices de vegetação (IRVI e NDVI). O estudo foi constituído de dois experimentos, sendo um realizado na safra de inverno de 2017, com aplicação de níveis de EETE na lâmina de irrigação, apresentando cinco tratamentos (11%, 31%, 60%, 87% e 100% de EETE) e o segundo nas safras de inverno de 2017 e 2018, constituído de cinco níveis de aplicação de água na cultura da aveia-branca (11%, 31%, 60%, 87% e 100% da evapotranspiração da cultura). Para o experimento de apenas uma safra (2017), os índices médios de NDVI na cultura obtidos por sensor terrestre ativo (GreenSeeker) foram correlacionados os componentes de crescimento e produtividade da cultura. Para a definição dos limites críticos de NDVI foram geradas equações dos valores de NDVI em função da produtividade de biomassa relativa (PBR), a partir da produtividade de biomassa média, em quatro estádios fenológicos. Foram considerados como críticos os valores de NDVI referentes a 90% e 110% da PBR. No experimento de duas safras (2017 e 2018), foram calibrados modelos para a estimativa da produtividade de grãos (PG) e de biomassa (PB) da aveia-branca em função dos índices de vegetação IRVI e NDVI em quatro estádios fenológicos, obtendo-se equações para cada situação. A calibração foi realizada com os dados experimentais de 2017. Para a validação dos modelos calibrados em 2017, foram utilizados os dados experimentais de 2018. A máxima PG (5.775 kg ha^{-1}) e PB ($20.731 \text{ kg ha}^{-1}$) de aveia-branca foram atingidas com doses de nitrogênio aplicadas via EETE de 45 kg ha^{-1} e 88 kg ha^{-1} , respectivamente. Leituras de NDVI apresentam correlações superiores a 0,85 com os atributos de crescimento e rendimento da aveia-branca. Os modelos apresentaram capacidade de generalização para a estimativa do rendimento da aveia-branca, especialmente para a PB. Modelos parametrizados em estádios fenológicos mais avançados e com o índice IRVI apresentaram menor erro médio de estimativa.

Palavras-chave: acurácia, IRVI, lâminas de irrigação, modelagem, NDVI, produtividade

AGRONOMIC PERFORMANCE OF WHITE OATS CROP, ASSESSED BY REMOTE SENSING, UNDER APPLICATION OF SEWAGE EFFLUENT TREATED AND IRRIGATION LEVELS

ABSTRACT – The use and reuse of water in agriculture is one of the world's major concerns today. Alternatives and practices that optimize this resource are always topics of debate and attention on the part of researchers and rulers. In order to increase efficiency and optimize the use and reuse of water, remote sensing of agricultural areas has proven to be an excellent alternative in the definition of specific management areas. The aim of this study was to evaluate the effects of treated sewage effluent (TSE) application on white oats (*Avena sativa* L.), defining management zones from remote sensing with vegetation index NDVI and to evaluate the generalization capacity of models estimating the yield of white oats as a function of vegetation indices (IRVI and NDVI). The study consisted of two experiments, one of which was performed in the winter crop of 2017, with application of TSE levels in the irrigation depth, presenting five treatments (11%, 31%, 60%, 87% and 100% of TSE) and the second in the winter crops of 2017 and 2018, consisting of five levels of water application in the white oats crop (11%, 31%, 60%, 87% and 100% of crop evapotranspiration). For the first experiment, the mean NDVI indices in the crop were obtained by active terrestrial sensor (GreenSeeker), which correlated the components of growth and crop yield. In order to define the critical limits of NDVI, values were generated as a function of relative biomass yield (RBY), from mean biomass yield, in four phenological stages, considering as critical the NDVI values referring to 90% and 110% of RBY. In the second experiment, models for estimation of grain yield (GY) and biomass (BY) of white oats were calibrated as a function of IRVI and NDVI vegetation indexes in four phenological stages, obtaining equations for each situation. Calibration was performed with the experimental data of 2017. For the validation of the calibrated models in 2017, the experimental data of 2018 were used. The maximum GY (5,775 kg ha⁻¹) and BY (20,731 kg ha⁻¹) of white oats were reached with nitrogen rates applied by TSE of 45 kg ha⁻¹ and 88 kg ha⁻¹, respectively. NDVI readings have correlations higher than 0.85 with the attributes of growth and yield of white oats. The models presented generalization capacity for estimating the yield of white oats, especially for BY. Parametrized models in more advanced phenological stages and with IRVI index presented smaller mean error of prediction.

Keywords: accuracy, irrigation depths, IRVI, modeling, NDVI, grain yield

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1.1 Introdução

A concentração da população em áreas urbanas vem incrementando significativamente a produção de efluentes de esgotos sanitários, o que poderá resultar em impactos ambientais consideráveis se medidas adequadas não forem tomadas em curto prazo. A utilização de águas residuárias na agricultura vem sendo amplamente estudada e recomendada por diversos pesquisadores em todo o mundo como alternativa viável para atender as necessidades hídricas e nutricionais das plantas, bem como alternativa para aumentar a sustentabilidade ambiental. A utilização de águas residuárias na agricultura irrigada pode ser uma prática efetiva de controle da poluição, aumento da disponibilidade hídrica e redução na demanda de fertilizantes para adubação convencional, apresentando benefícios econômicos, sociais e ambientais (Hespanhol, 2003).

No Brasil, a prática de tratamento do esgoto ainda é incipiente e necessita de ações que apoiem seu tratamento e reúso. Em 2008, somente em 44,8% dos municípios brasileiros o esgoto era coletado e o tratamento era realizado em apenas 28,5% do esgoto coletado (IBGE, 2008). Considerando a cidade de Jaboticabal, SP, com produção média de $174 \text{ L hab}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ de esgoto (SNIS, 2017), população de 76.196 habitantes (IBGE, 2016) e, se adotando a demanda hídrica pelas culturas de 5 mm dia^{-1} , a área a ser irrigada com efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE) no município, sem considerar a precipitação, seria de 264,78 ha. Considerando a diluição com 50% ou 75% de água ao efluente puro, a área a ser irrigada seria o dobro ou quatro vezes mais, respectivamente. Além da redução de custos de produção com o aporte de nutrientes oriundos do efluente, e da maior renda líquida pela maior produtividade da cultura, talvez o maior benefício da fertirrigação com EETE seja o ambiental, pela possibilidade de mitigar a contaminação dos cursos d'água, mesmo esse sendo um resíduo tratado.

Existem várias limitações para a aplicação de EETE na agricultura, tendo em vista o comprometimento do lençol freático e do perfil do solo, além de restrições de saúde pública e de normas ambientais. Outro entrave para a ampla utilização de EETE

na agricultura brasileira é que, devido à pouca experiência com a utilização de efluentes em irrigação no país, não existe legislação específica que regulamente a utilização desse resíduo na agricultura, havendo, portanto, necessidade de pesquisas para se obtenha conhecimentos específicos para abalizar o manejo sustentável dessa prática. Dessa maneira, para que o reúso da água na agricultura se torne prática viável e ambientalmente correta, é necessário aperfeiçoar as técnicas de aplicação e manejo da fertirrigação com uso de águas residuárias, bem como o manejo das culturas que serão fertirrigadas.

Estudos recentes realizados na FCAV-Unesp (Santos, 2015) e na Unicamp (Gonçalves et al., 2017) dão continuidade às pesquisas realizadas anteriormente (Santos, 2006; Fonseca et al, 2007a; Fonseca et al, 2007b; Leal, 2007; Silva, 2013), com resultados importantes sobre a utilização de EETE em culturas de cana-de-açúcar e pastagem (tifton e braquiária). Como a braquiária, a aveia não apresenta restrições ao consumo do grão ou forragem produzidos sob fertirrigação com água de reúso, além de apresentar boa resposta à irrigação e à suplementação nutricional de nitrogênio, sendo esse o nutriente em maior concentração no EETE (Primavesi et al., 2004).

Devido à sazonalidade da precipitação na região Sudeste do Brasil, a irrigação é fundamental para obtenção de produtividades rentáveis de cultivos, principalmente durante o outono-inverno, podendo-se alcançar incrementos superiores a 250% nas produtividades de culturas irrigadas em relação ao cultivo de sequeiro (Boschini et al., 2011).

Além da utilização de águas residuárias, outra preocupação mundial é em relação a quantidade de água utilizada na agricultura. As alternativas tecnológicas para viabilizar o uso de irrigação devem incluir técnicas que asseguram o suprimento hídrico adequado nas épocas de escassez, destacando-se como alternativas a redução da disponibilidade e o incremento da eficiência de uso de água (EUA), ou produtividade da água, pela adoção de manejo adequado da irrigação, associado à utilização de sistemas de aplicação de água que minimizam as perdas por evaporação e percolação. Pesquisas indicam que as culturas podem obter seu máximo rendimento quando cultivadas sob irrigação deficitária, ou seja, a máxima produtividade é alcançada com uma reposição hídrica inferior a 100% do que é consumido (Costa et

al., 2016). Dessa maneira, deve-se observar o nível de irrigação ideal para cada cultivo, garantindo a maior produção de biomassa por quantidade de água utilizada.

Além dos elevados incrementos de produtividade em culturas de inverno no Brasil, também se observa que sob irrigação suplementar, culturas de verão, como a soja, podem ter a produtividade aumentada em até 45% (Vivan et al., 2013). Com uma agricultura cada vez mais competitiva, a irrigação torna-se tecnologia fundamental para garantir aos agricultores elevados rendimentos em culturas de inverno e uma segurança para minimizar efeitos do déficit hídrico em fases críticas no desenvolvimento das plantas, como o florescimento e enchimento de grãos, no verão.

Recentemente, estudos indicam que através de sensoriamento remoto é possível identificar áreas com maior déficit hídrico e, a partir de mapas temáticos, definir a quantidade de água a ser aplicada em taxa variável (Zarco-Tejada et al., 2013; Ihuoma e Madramootoo, 2017). Para isso, índices espectrais como os índices de vegetação são muito utilizados, uma vez que indicam com acurácia o estado fisiológico das plantas. Além disso, a aplicação de modelos para a estimativa da produtividade das culturas em função de índices de vegetação permite a definição das zonas de manejos para outras safras, uma vez que a produtividade representa a variabilidade de condições edáficas que as culturas foram submetidas nas áreas agrícolas (Grohs et al., 2009). Dessa maneira, a calibração de modelos de estimativa de produtividade em cada área pode auxiliar na definição de mapas temáticos que servirão como base na aplicação de água e nutrientes nas culturas em taxa variável.

A busca pela redução do custo de produção nas lavouras é fundamental. Dessa forma, a utilização de águas residuárias provenientes de tratamento de esgoto torna-se excelente alternativa para o produtor, seja pelo aumento da produtividade por ocasião da irrigação, como também pela redução na quantidade de fertilizantes a serem aplicados nos cultivos, uma vez que são encontradas elevadas concentrações de nutrientes nesses resíduos, especialmente N e K. Além disso, é necessário a obtenção de resultados que demonstrem o efeito das águas residuárias no solo e nas culturas, uma vez que podem ocorrer problemas como contaminação, salinização e elevada lixiviação de nutrientes, gerando informações para a determinação, futuramente, do volume máximo de EETE a ser aplicado nos cultivos. Em locais onde não é possível a utilização de águas residuárias, seja por ocasião de falta de

tratamento de esgoto ou até mesmo devido à elevada distância do local de tratamento, a definição dos níveis de irrigação que geram a maior eficiência na conversão de biomassa torna-se fundamental para a otimização da água, como também na diminuição dos custos decorrente dessa prática nas lavouras.

Assim, objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação de efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE) na cultura de aveia branca (*Avena sativa* L.), definindo-se zonas de manejo a partir de sensoriamento remoto com o índice de vegetação NDVI e avaliar a capacidade de generalização de modelos de estimativa da produtividade de aveia-branca em função de índices de vegetação (IRVI e NDVI).

1.2 Revisão de literatura

1.2.1 Aveia-branca (*Avena sativa* L.)

A aveia pertence à divisão Magnoliophyta, classe Liliopsida, família Poaceae e gênero *Avena*. Acredita-se que o centro de origem da aveia é nas regiões da Ásia Menor ou norte da África (Allard, 1971). As principais espécies cultivadas no Brasil são a aveia-branca (*Avena sativa* L.), aveia-amarela (*Avena byzantina* C. Koch) e aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb), sendo que as duas primeiras são utilizadas com duplo propósito, seja para produção de grãos ou como forragem e a última apenas como forrageira.

A aveia-branca é uma planta autógama, atinge aproximadamente 1 metro de altura, apresenta raízes fasciculadas e inflorescências do tipo panícula. É uma gramínea C₃ cultivada majoritariamente em clima temperado. Entretanto, pode ser cultivada em regiões subtropicais e tropicais, desde que a temperatura no período do florescimento da cultura não ultrapasse 32 °C (Primavesi et al., 2000).

No Brasil, devido a sua multiplicidade de usos, a cultura da aveia-branca é uma excelente opção agrícola para cultivo no inverno. Pode ser utilizada para produção de palhada em sistema de plantio direto, pastejo direto, produção de feno ou silagem como também para a produção de grãos. Nesse último caso, o produto é utilizado tanto para alimentação humana quanto animal, fazendo parte da composição de rações, possuindo composição com 58,7% de carboidratos e 14% de proteínas

(Welch, 2011). A importância da cultura da aveia vem crescendo exponencialmente no Brasil nos últimos 10 anos, uma vez que a área plantada passou de 106,1 10³ ha em 2007 para 291,5 10³ ha em 2017, crescimento de 174%, além de apresentar produtividade média de 2 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2017).

Para o aumento da produtividade da cultura, verifica-se que o manejo da adubação nitrogenada torna-se essencial. Para produção de forragem, o máximo retorno econômico, em plantio convencional, é obtido com dose de N equivalente a 160 kg ha⁻¹ (Primavesi et al., 2004). Para a produção de grãos, doses de N equivalentes a 80 kg ha⁻¹ garantem produtividades que variam de 3,2 t ha⁻¹ (Kolchinski e Schuch, 2003) a 3,8 t ha⁻¹ (Ceccon et al., 2004). No entanto, nesses estudos a fonte de N utilizada foi a mineral, não verificando-se na literatura a avaliação da aplicação de EETE como fonte de N no desempenho agrônomo da aveia-branca. Devido à isso, estudos nesse sentido são necessários para a definição de doses de N via EETE que devem ser aplicadas para a maximização do rendimento da cultura, dependendo da finalidade da produção.

Outro fator limitante para a expansão da cultura no Brasil é a disponibilidade de água nas diferentes regiões. A necessidade hídrica da cultura é próxima de 320 mm durante o ciclo (Frizzone et al., 1995). No entanto, devido às condições climáticas da região sudeste, por exemplo, que possui inverno seco e verão chuvoso, a precipitação anual normal, para o período de cultivo da aveia-branca, é inferior a necessidade hídrica da cultura. Para o município de Jaboticabal, a precipitação anual normal entre maio e agosto (época de cultivo) é de 130 mm, valor 58,45% inferior à necessidade da cultura. Dessa maneira, para obtenção de elevadas produtividades e retorno econômico, a utilização da irrigação é indispensável.

Dessa forma, dentre os manejos realizados no ciclo da aveia-branca, a adubação nitrogenada e a irrigação tornam-se ferramentas fundamentais para a obtenção de elevadas produtividades e retorno econômico ao produtor, contribuindo para a expansão da cultura em áreas consideradas marginais ao cultivo. Além disso, para que o sistema garanta sustentabilidade, é necessário obter a dose máxima de N e o nível ideal de irrigação que garanta o maior produtividade da planta.

1.2.2 Águas residuárias na agricultura

A preocupação mundial em torno do aproveitamento e utilização da água é um dos temas mais debatidos atualmente. Toda a atenção é voltada para que a água seja melhor aproveitada, garantindo o abastecimento tanto para as atividades humanas, agrícolas e industriais. Dentro desse contexto, a utilização de águas residuárias na agricultura ganha destaque, uma vez que a atividade agrícola é a que mais consome água em todo o mundo (70% do total) e, dessa maneira, sobraría maior quantidade de água de qualidade para outras atividades (ANA, 2016). As vantagens do uso de águas residuárias na agricultura são diretas, devido ao aumento da produtividade das culturas por ocasião da irrigação e dos nutrientes presentes no efluentes e, também, indiretas, uma vez que se limita o lançamento da água residuária em leitos de rios e córregos, fato que causaria a contaminação e possível eutrofização desses cursos d'água (Cai et al., 2013).

Estudos importantes sobre o tema já foram realizados em algumas situações e regiões brasileiras, dentre as quais se destacam o Programa de Saneamento Básico – PROSAB, gerenciado pela FINEP (Santos, 2006), e os projetos conduzidos entre 2000 e 2010 por pesquisadores da ESALQ, Cena e Nupegel, com águas residuárias das estações de tratamento de esgoto de Piracicaba e Lins, SP (Fonseca et al, 2007a; Fonseca et al, 2007b; Leal, 2007; Silva, 2013).

Em um estudo recente conduzido em Jaboticabal, SP, durante dois anos, Santos (2015) concluiu que o efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE) do município forneceu até 1.132 kg ha⁻¹ de nitrogênio e até 464 kg ha⁻¹ de potássio por ano, além de outros macronutrientes e micronutrientes essenciais, para a fertirrigação de *Urochloa brizantha*, resultando em incremento de até 121% na produção de forragem. Nesse estudo, conclui-se que a aplicação de EETE de Jaboticabal, mesmo em doses elevadas, apresenta baixo risco de contaminação do solo, devido às altas taxas de exportação do nutriente pela forragem e lixiviação de sais pela irrigação e precipitação.

É praticamente consensual entre os pesquisadores que a utilização de EETE via irrigação depende da cultura de interesse. Isso ocorre, pois, embora o esgoto seja tratado, ainda pode permanecer no resíduo microrganismos patogênicos aos animais

e seres humanos. Dessa maneira, pode ocorrer contaminação de alimentos que são consumidos in natura como, por exemplo, o pimentão (Almuktar e Scholz, 2016), a alface (Castro et al., 2013) e tomate (Forslund et al., 2012). Em cultivo hidropônico, no entanto, como o produto não tem contato com a água residuária, a contaminação não ocorre e a utilização de EETE é recomendável (Cuba et al., 2015). No caso de pastejo animal com *Urochloa* spp., desde que respeitado um período de carência de no mínimo 5 dias entre a irrigação e o pastejo, a utilização de EETE pode ser indicada (Santos, 2015). Para culturas em que o produto colhido não possui contato direto com o EETE, como, por exemplo, a cana-de-açúcar, café, aveia, feijão, trigo, entre outros, a irrigação com água residuária não é problema. Se as técnicas de tratamento e manejo de água residuária forem realizadas corretamente, o risco de contaminação dos produtos agrícolas é mínimo (Rezende et al., 2014).

Outro fator que pode restringir a utilização de EETE na irrigação de culturas é a contaminação e salinização do solo, dos cursos d'água e do lençol freático. Em regiões com precipitação anual superior a evapotranspiração, não é verificado problemas de salinização dos solos por ocasião da aplicação de águas residuárias (Erthal et al., 2010; Silva et al., 2012), pelo contrário, ainda se observa maior atividade microbiana no solo por ocasião da aplicação (Simões et al., 2013).

A aplicação de águas residuárias na agricultura possui os três preceitos básicos da sustentabilidade (Fonseca et al, 2007a). É ambiental e socialmente correta, pois se deixa de jogar grande quantidade de matéria orgânica e elementos químicos nos cursos d'água, podendo causar eutrofização e contaminação da água (CAI et al., 2013). Além disso, como pode substituir integralmente a adubação nitrogenada dos cultivos, há diminuição no consumo de fontes de energia não renovável, como o petróleo, matéria-prima utilizada para a fabricação de fertilizantes nitrogenados pelas indústrias. Outro destaque se deve a ser uma prática economicamente viável e lucrativa, uma vez que além dos benefícios econômicos diretos pela utilização da irrigação nos cultivos, devido ao aumento da produtividade, ocorre diminuição dos custos de produção, principalmente por conta da redução da quantidade de fertilizantes a serem aplicados, especialmente nitrogênio e potássio.

A pouca experiência com a utilização de efluentes em irrigação no país resulta na falta de legislação para a aplicação de água de esgoto tratado na agricultura.

Assim, há carência de estudos para embasar a elaboração de legislação específica e também para a instalação de protótipos a serem testados em cidades pequenas e médias. Nesses protótipos, as estações de tratamento de esgoto seriam vinculadas às áreas agrícolas adjacentes, fazendo o reúso da água e evitando o lançamento do efluente nos mananciais, com benefício para a agricultura e para o meio ambiente.

1.2.3 Irrigação deficitária na agricultura

Em regiões onde a quantidade de água é limitada, a busca de informações e conhecimentos que permitem elevar a eficiência do seu uso é fundamental. Dentro desse contexto, a irrigação deficitária pode ser utilizada como alternativa para economia de água e redução dos custos de irrigação, além de maior retorno econômico. Entretanto, esse manejo pode estar associado ao risco de perda de produtividade, impactando no rendimento agrícola, uma vez que se aplica água em quantidade menor do que a evapotranspiração da cultura.

Avaliando a viabilidade econômica da irrigação deficitária, observa-se que em lavouras de sorgo a lâmina de irrigação que fornece 75% da ET_c é a que garante maior receita líquida, enquanto que a lâmina de 25% garante maior retorno econômico, uma vez que cada real investido com aplicação de água, há o retorno de R\$2,80 (Zwirtes et al., 2015). Para lavouras de milho destinadas para a produção de grãos, dependendo do preço do produto, lâminas de irrigação de 80% da ET_c são economicamente viáveis para o manejo da irrigação (Martins et al., 2016). Para produção de silagem de milho, lâminas de irrigação de 50% da ET_c garantem o maior retorno econômico, uma vez que para cada real gasto com irrigação a receita bruta de retorno é de R\$24,22 (Martins et al., 2012). Estratégias de manejo associadas à irrigação deficitária, como a adubação silicatada, por exemplo, podem dar ainda mais subsídios e segurança na adoção de manejo com déficit nas lavouras, uma vez que esse elemento benéfico atua no metabolismo da planta de tal forma que reduz a sensibilidade ao déficit hídrico (Camargo et al., 2017).

Além do benefício econômico, a irrigação deficitária garante maior eficiência no uso da água (EUA), ou produtividade da água, para as culturas. A EUA é calculada a partir da produtividade da biomassa do produto agrícola pela lâmina de irrigação

aplicada. Estudos demonstram que maiores valores de EUA são alcançados quando lâminas de irrigação com déficit são aplicadas em diferentes culturas, tais como a aveia (Lin et al., 2012), a batata-doce (87,3% da ETc) (Mantovani et al., 2013), o tomate (50% da ETc) (Patanè et al., 2011) e a batata (40% da ETc) (Badr et al., 2012).

Portanto, observa-se que as vantagens da utilização da irrigação deficitária na agricultura podem ir desde o maior retorno econômico até a sustentabilidade ambiental, uma vez que o recurso água é otimizado. Dessa maneira, estudos com diferentes espécies de interesse agrícola, associados a diversas taxas de reposição hídrica no solo, tornam-se fundamentais para garantir aos produtores um manejo da irrigação que garanta sustentabilidade e economia ao sistema.

1.2.4 Sensoriamento remoto

Na agricultura, a utilização do sensoriamento remoto permite a definição de ações no manejo das culturas. Diversos índices podem ser utilizados para o sensoriamento remoto, apresentando baixo custo, elevada viabilidade e indicando com precisão o estado fisiológico das culturas (Zarco-Tejada et al., 2013). Dentre os índices mais conhecidos estão os de vegetação, no qual estão inseridos o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse et al., 1974) e Inverse Ratio Vegetation Index (IRVI) (Richardson e Wiegand, 1977). A partir do mapeamento da resposta espectral das culturas em função dos valores desses índices, por exemplo, manejos como adubação e irrigação em taxa variável podem ser recomendados.

A avaliação desses índices permite identificar o estado nutricional das plantas, especialmente em relação ao nitrogênio (Santos et al., 2017; Coelho et al., 2018b; ZHAO et al., 2018). Além disso, o estresse hídrico das culturas pode ser identificado por sensoriamento remoto (Ihuoma e Madramootoo, 2017).

A utilização de medidas indiretas na agricultura, associadas à modelagem, pode ser um bom indicativo da produtividade das culturas e ajudar na distinção de zonas de manejo específico (Coelho et al., 2018a; Zhao et al., 2018). Estimativas de produtividade, biomassa, teor de proteína, necessidade de adubação nitrogenada e controle de plantas daninhas são manejos utilizados a partir do sensoriamento remoto (Yao et al., 2012; Kapp Júnior et al., 2016; Pantazi et al., 2016).

Além de estimar o crescimento e produtividade de culturas, o sensoriamento remoto permite identificar genótipos responsivos à irrigação e/ou adubação (Jin et al., 2018). Em genótipos com resposta positiva à aplicação de água e nutrientes, os valores médios de NDVI apresentam tendência crescente com o aumento das quantidades de água aplicadas (Rissini et al., 2015). A partir disso, é possível definir áreas de manejo da quantidade de recursos (água e nutrientes) a serem aplicados. Pela definição de mapas com valores médios de NDVI, as zonas com valores do índice superiores a 95% das demais são utilizadas como possíveis áreas com produtividades potenciais das culturas, podendo fazer a adubação nitrogenada a taxas variáveis em função desses níveis, adotando-se a recomendação padrão de fertilizantes para a cultura nessas áreas, por exemplo, e acrescentando gradativamente a dose de acordo com o decréscimo dos valores do índice no restante da área (Lobell, 2013).

Entretanto, a acurácia de predição de atributos de rendimento e tecnológicos das culturas utilizando índices de vegetação é variável em função de diversos fatores como, o estágio fenológico de avaliação e o índice utilizado (Bredemeier et al., 2013; Bolton e Friedl, 2013). Dessa maneira, é fundamental a definição do melhor estágio da cultura para a avaliação utilizando geotecnologias, indicando o índice mais adequado e que proporciona a maior acurácia em relação às variáveis agrônômicas a serem determinadas.

1.3 Referências

Allard RW (1971) Introdução e cultivo de plantas. In.: Allard RW (Ed.) **Princípios do melhoramento genético das plantas**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, p.16-24.

Almuktar SAAAN, Scholz M (2016) Mineral and biological contamination of soil and *Capsicum annuum* irrigated with recycled domestic wastewater. **Agricultural Water Management** 137:95-109.

ANA: Agência Nacional de Águas (2016) **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil – 2014**. Relatório síntese. Brasília, 33 p.

Badr MA, El-Tohamy WA, Zaghoul AM (2012) Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region. **Agricultural Water Management** 110:9-15.

Boschini APM, Silva CL, Oliveira CAS, Oliveira Júnior MP, Miranda MZ, Fagioli M (2011) Aspectos quantitativos e qualitativos do grão de trigo influenciados por nitrogênio e lâminas de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 15:450-457.

Bolton DK, Friedl MA (2013) Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. **Agricultural and Forest Meteorology** 173:74-84.

Bredemeier C, Variani C, Almeida D, Rosa AT (2013) Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural** 43:1147-1154.

Cai T, Park SY, Li Y (2013). Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: status and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 19:360-369.

Camargo MS, Bezerra BKL, Vitti AC, Silva MA, Oliveira AL (2017) Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant nutrition** 17:99-111.

Castro E, Mañas P, Las Heras J (2013) Effects of wastewater irrigation in soil properties and horticultural crop (*Lactuca sativa* L.). **Journal of Plant Nutrition** 36:1659-1677.

Ceccon G, Grassi Filho H, Bicudo SJ (2004) Rendimento de grãos de aveia branca (*Avena sativa* L.) em densidades de plantas e doses de nitrogênio. **Ciência Rural** 34:1723-1729.

Coelho AP, Rosalen DL, Faria RT (2018a) Vegetation indices in the prediction of biomass and grain yield of white oat under irrigation levels. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 48:109-117.

Coelho AP, Faria RT, Dalri AB, Palaretti LF, Zanini JR (2018b) Clorofilômetro portátil como forma de manejo da irrigação e adubação nitrogenada em aveia-branca. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** 12:2542.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento (2017) **Acompanhamento da safra brasileira**: grãos. Sexto Levantamento, v.4, n.6. março/2017. Disponível em: < http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_03_14_15_28_33_boletim_graos_marco_2017bx.pdf > Acesso em 25 mai. 2017.

Costa CTS, Saad JC, Silva Júnior HM (2016) Growth and productivity of sugarcane varieties under various irrigation levels. **Revista Caatinga** 29:945-955.

Cuba RS, Carmo JR, Souza CF, Bastos RG (2015) Potencial de efluente de esgoto doméstico tratado como fonte de água e nutrientes no cultivo hidropônico de alface. **Revista Ambiente e Água** 10:574-586.

Erthal VJT, Ferreira PA, Matos AT, Pereira OG (2010) Alterações físicas e químicas de um Argissolo pela aplicação de água residuária de bovinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 14:467-477.

Fonseca AF, Herpin U, Paula AM, Victória RL, Melfi AJ (2007a) Agricultural use of treated sewage effluents: agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil. **Scientia Agricola** 64:194-209.

Fonseca AF, Melfi AJ, Monteiro F, Montes CR, Almeida VV, Herpin U (2007b) Treated sewage effluent as a source of water and nitrogen for Tifton 85 bermudagrass. **Agricultural Water Management** 87:328-336.

Frizzone JA, Teodoro REF, Pereira AS, Botrel TA (1995) Lâminas de água e doses de nitrogênio na produção de aveia (*Avena sativa* L.) para forragem. **Scientia Agricola** 52:578-586.

Forslund A, Ensink JHJ, Markussen B, Battilani A, Psarras G, Gola S, Sandei L, Fletcher T, Dalsgaard A (2012) *Escherichia coli* contamination and health aspects of soil and tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) subsurface drip irrigated with on-site treated domestic wastewater. **Water Research** 46:5917-5934.

Grohs DS, Bredemeier C, Mundstock CM, Poletto N (2009) Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola** 29:101-112.

Gonçalves IZ, Barbosa EAA, Santos LNS, Nazário AA, Feitosa DRC, Tuta NF, Matsura EE (2017) Water relations and productivity of sugarcane irrigated with domestic wastewater by subsurface drip. **Agricultural Water Management** 185:105-115.

Hespanhol I (2003) Potencial de reuso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos. **Revista Bahia Análise e Dados** 13:411-437.

Ihuoma SO, Madramootoo CA (2017) Recent advances in crop water stress detection. **Computers and Electronics in Agriculture** 141:267-275.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2008) **Rede Coletora de Esgoto**. Brasília: IBGE. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/0000000105.pdf>> Acesso em 10 jun. 2017.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2016) **Censo demográfico**. Brasília: IBGE. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/v4/brasil/sp/jaboticabal/panorama>> Acesso em 10 jun. 2017.

Jin X, Yang G, Li Z, Xu X, Wang J, Lan Y (2018) Estimation of water productivity in winter wheat using the AquaCrop model with field hyperspectral data. **Precision Agriculture** 19 1-17.

Kapp Junior C, Guimarães AM, Caires EF (2016) Use of active canopy sensors to discriminate wheat response to nitrogen fertilization under no-tillage. **Engenharia Agrícola** 36:886-894.

Kolchinski EM, Schuch LOB (2003) Eficiência no uso do nitrogênio por cultivares de aveia-branca de acordo com a adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27:1033-1038.

Leal RMP (2007) **Efeitos da irrigação com efluente de esgoto tratado em propriedades químicas de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar**. 110 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

Lin Y, Zeng Z, Ren C, Hu Y (2012) Water use Efficiency and Physiological Responses of Oat under Alternate Partial Root-zone Irrigation in the Semiarid Areas of Northeast China. **Procedia Engineering** 28:33-42.

Lobell DB (2013) The use of satellite data for crop yield gap analysis. **Field Crops Research** 143:56-64.

Mantovani EC, Delazari FT, Dias LE, Assis IR, Vieira GHS, Landim FM (2013) Eficiência no uso da água de duas cultivares de batata-doce em resposta a diferentes lâminas de irrigação. **Horticultura brasileira** 31:602-606.

Martins JD, Carlesso R, Aires NP, Gatto JC, Dobou V, Fries HM, Scheibler RB (2012) Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho. **Irriga** 1:192-205.

Martins JD, Petry MT, Rodrigues GC, Carlesso R (2016) Viabilidade econômica da irrigação deficitária em milho irrigado por gotejamento. **Irriga** 1:150-165.

Pantazi XE, Moschou D, Bravo C (2016) Active learning system for weed species recognition based on hyperspectral sensing. **Biosystems Engineering** 146:193-202.

Patanè C, Tringali S, Sortino O (2011) Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. **Scientia Horticulturae** 129:590-59.

Primavesi AC, Rodrigues AA, Godoy R (2000) Clima e solo. In.: Primavesi AC, Rodrigues AA, Godoy R (Eds.) **Recomendações técnicas para o cultivo de aveia**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, p.7-8.

Primavesi AC, Primavesi O, Cantarella H, Godoy R (2004) Resposta da aveia branca à adubação em Latossolo vermelho-Amarelo em dois sistemas de plantio. **Revista Brasileira de Zootecnia** 33:79-86.

Richardson AJ, Wiegand CL (1977) Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 43:1541-1552.

Rissini AL, Kawakami J, Genú AM (2015) Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:1703-1715.

Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW (1974) **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. Third ERTS-1 Symposium (pp. 309–317). Washington, DC: NASA.

Rezende RL, Morais PC, Melo AF (2014) **Qualidade das águas residuárias para irrigação**. Boletim Técnico – n°99 – Editora UFLA. Lavras-MG, p. 1-31.

Santos FG (2006) **Aspectos morfológicos e índice de crescimento dos capins *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, *Cynodon dactylon* cv. Tifton 85 e *Panicum maximum* cv. Tanzânia, para a região agropastoril de Itapetinga-BA**. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - UESB, Vitória da Conquista.

Santos GO (2015) **Aplicação de efluente de tratamento de esgoto, via aspersão, no solo e em *Brachiaria***. 197 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência do solo) – Unesp, Jaboticabal.

Santos GO, Rosalen DL, Faria RT (2017) Use of active optical sensor in the characteristics analysis of the fertigated brachiaria with treated sewage. **Engenharia Agrícola** 37:1213-1221.

SNIS. Serviço Nacional de Informações Sobre Saneamento (2017) **Diagnósticos dos serviços de água e esgotos, 2015**. Disponível em:<<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2015>> Acesso em 10 jun. 2017.

Silva JBG, Martinez MA, Pires CS, Andrade IPS, Silva GT (2012) Avaliação da condutividade elétrica e pH da solução do solo em uma área fertirrigada com água residuária de bovinocultura de leite. **Irriga** 1:250-263.

Silva AGB (2013) **Efeito da irrigação com efluente de esgoto rico em sódio em propriedades químicas e físico-hídricas de um Argissolo e produtividade de capim Tifton 85 no município de Lins**. 83 F. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos e nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ, Piracicaba.

Simões KS, Peixoto MFSP, Almeida AT, Ledo CAS, Peixoto CP, Pereira FAC (2013) Água residuária de esgoto doméstico tratado na atividade microbiana do solo e crescimento da mamoneira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 17:518-523.

Vivan GA, Peiter MX, Robaina AD, Barboza FS, Buske TC (2013) Rendimento relativo da cultura da soja em função da lâmina de irrigação. **Irriga** 18:282-292.

Welch RW (2011) Nutrient Composition and Nutritional Quality of Oats and Comparisons with Other Cereal. In.: Webster FH, Wood PJ (Eds.). **Oats, Chemistry and technology** Minesota: St. Paul, p.95-98.

Yao Y, Miao Y, Huang S, Gao L, Ma X, Zhao G et al. (2012) Active canopy sensor-based precision N management strategy for rice. **Agronomy for sustainable development** 32:925-933.

Zarco-Tejada PJ, González-Dugo V, Williams LE, Suárez L, Berni JÁ, Goldhamer D, Fereres E (2013). A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. **Remote sensing of environment** 138:38-50.

Zhao B, Duan A, Ata-UI-Karim ST, Liu Z, Chen Z, Gong Z et al. (2018) Exploring new spectral bands and vegetation indices for estimating nitrogen nutrition index of summer maize. **European Journal of Agronomy** 93:113-125.

Zwirtes AL, Carlesso R, Petry MT, Kunz J, Reimann GK (2015) Desempenho produtivo e retorno econômico da cultura do sorgo submetida à irrigação deficitária. **Engenharia Agrícola** 35:676-688.

CAPÍTULO 2 - Desempenho agrônômico de aveia-branca cultivada sob fertirrigação com efluente de esgoto tratado e definição de limites críticos de NDVI¹

RESUMO- Dentre os benefícios da irrigação com águas residuárias na agricultura, destacam-se a redução na utilização de fertilizantes minerais e o aumento da produtividade das culturas. Para a aplicação de águas residuárias, a utilização de sensoriamento remoto pode auxiliar na definição de áreas de manejo específico. Objetivou-se avaliar os atributos de rendimento e crescimento de aveia-branca irrigada com níveis de efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE), correlacionar esses atributos com valores de índice de vegetação (NDVI) obtidas em quatro estádios fenológicos da cultura e definir limites críticos de NDVI. O experimento constituiu-se de cinco tratamentos sob níveis de concentração de EETE na lâmina de irrigação (11%, 31%, 60%, 87% e 100%). Obtiveram-se os índices médios de NDVI na cultura por sensor terrestre ativo (GreenSeeker), os quais foram correlacionados com a altura, índice de área foliar máximo (IAF), panículas m^{-2} , número de grãos panícula⁻¹, massa de 1000 grãos, produtividade de grãos (PG) e biomassa (PB). Para a definição dos limites críticos de NDVI foram geradas equações dos valores de NDVI em função da PB relativa, a partir de PB média, em quatro estádios fenológicos, considerando como críticos os valores de NDVI referentes a 90% e 110% da PB relativa. A máxima PG (5.775 kg ha^{-1}) e PB ($20.731 \text{ kg ha}^{-1}$) de aveia-branca foram atingidas com doses de nitrogênio aplicadas via EETE de 45 kg ha^{-1} e 88 kg ha^{-1} , respectivamente. Leituras de NDVI apresentam correlações superiores a 0,85 com os atributos de crescimento e rendimento da aveia-branca. A definição dos limites críticos de NDVI para a aveia-branca apresentou maior precisão no estádio fenológico 10.5.4.

Palavras-chave: água residuária, biomassa, modelagem, NDVI, sensoriamento remoto

2.1 Introdução

No mundo, a área cultivada com aveia é de $9,52 \cdot 10^6$ ha, com produção total de $23,52 \cdot 10^6$ Mg e produtividade média de $2,47 \text{ Mg ha}^{-1}$ (USDA, 2018). O Brasil é o 5º maior produtor mundial da cultura, apresentando grande crescimento da área plantada nos últimos 10 anos (CONAB, 2018). Em função da composição nutricional (62% de carboidratos e 11% de proteína) (Chepulis et al., 2017) e das características culturais da aveia-branca, é considerada uma excelente opção para alimentação animal e cultivo no inverno brasileiro. Em sistema de plantio direto, a palhada produzida pela aveia apresenta correlação direta com a produtividade da cultura de verão subsequente, tornando-se muito indicada para esse sistema (Damian et al., 2017).

¹ Este capítulo corresponde ao artigo científico submetido à revista *Bragantia* e encontra-se em avaliação para publicação.

Devido às características climáticas de grande parte do território brasileiro no inverno, apresentando baixa precipitação, a água torna-se limitante para o rendimento das culturas nessa época. Sob irrigação, os incrementos da produtividade de grãos e biomassa da aveia-branca chegam a 52% e 37%, respectivamente (Jat et al., 2017; Panasiewicz et al., 2017). Visando alcançar maior sustentabilidade ambiental, devem-se utilizar sistemas, fontes de água e manejo de irrigação que otimizem a quantidade de água aplicada nos cultivos. Nesse contexto, a utilização de águas residuárias na agricultura, como o efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE), torna-se alternativa viável para aumentar a disponibilidade de água de qualidade para outras atividades.

O uso de EETE como água de irrigação é uma alternativa promissora para atender a demanda hídrica e nutricional das plantas (Gonçalves et al., 2017). Pode suprir completamente a adubação nitrogenada e grande parte da adubação potássica das culturas, observando-se incrementos de produtividade em relação à adubação mineral (Fortes Neto et al., 2013; Santos et al., 2017a). Ainda, a aplicação de EETE aumenta a fertilidade do solo (Rosa et al., 2017) e não prejudica as suas propriedades físico-hídricas (Andrews et al., 2016), especialmente em regiões de clima úmido, onde há maior crescimento das culturas, gerando maior exportação de nutrientes e maior quantidade de resíduos vegetais que promovem a melhoria da qualidade física do solo. Outra vantagem da aplicação de EETE no solo é a diminuição da contaminação de corpos d'água que receberiam diretamente o resíduo, pois esse apresenta grande quantidade de nutrientes e elevada concentração de carbono orgânico, podendo levar à eutrofização dos cursos hídricos (Cai et al., 2013).

Como a irrigação com água residuária é incipiente no Brasil e ainda são pouco conhecidos os seus efeitos sob a nutrição da maioria das culturas, devido à complexidade dos fatores do sistema solo-planta-atmosfera, o uso de geotecnologias pode ser uma das soluções para definir manejos de fertirrigação em áreas em que se utilizam esse resíduo. Por sensoriamento remoto, índices de vegetação como o NDVI podem ser utilizados para a definição de aplicação de insumos a taxa variável e de zonas de manejo específico. Essa técnica é necessária, pois a quantidade de esgoto gerado nas cidades é limitada, interferindo diretamente na área potencialmente irrigada com EETE. Uma das alternativas para contornar esse problema seria diluir o

EETE com água a fim de aumentar a área irrigada com EETE. Como existe elevada correlação entre leituras de NDVI e a fertilidade dos solos (Sultana et al., 2014), áreas com maiores valores de NDVI podem receber menor quantidade de EETE sem afetar o rendimento das culturas.

Objetivou-se avaliar os atributos de rendimento e crescimento de aveia-branca irrigada com níveis de efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE), correlacionar esses atributos com leituras de índice de vegetação (NDVI) obtidas em quatro estádios fenológicos da cultura e definir limites críticos de NDVI.

2.2 Material e métodos

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp, Jaboticabal, SP (latitude 21°14'44" S, longitude 48°17'00" W e altitude de 545 metros). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, subtropical, relativamente seco no inverno, com chuvas de verão, apresentando temperatura média anual de 22°C e precipitação anual normal de 1.424 mm (Alvares et al., 2013). O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho eutrófico (EMBRAPA, 2013), cujos atributos físicos e químicos são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo da área experimental

Camada (m)	ds* (kg m ⁻³)	θ* CC* (m ³ m ⁻³)	θ* PMP* (m ³ m ⁻³)	Areia total	Argila	Silte	Textura do solo					
0,00-0,20	1,45	0,45	0,33	310	470	220	Argiloso					
0,20-0,40	1,49	0,41	0,30	270	530	200	Argiloso					
Camada (m)	pH CaCl ₂	M.O. (g dm ⁻³)	P _{resina} (mg dm ⁻³)	S	H+Al	Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
0,00-0,20	5,6	40	67	5	21	1	3,4	36	13	52,7	73,9	71
0,20-0,40	5,8	40	68	5	20	1	3,2	36	11	50,3	70,4	71
Camada (m)	Boro	Cobre	Ferro	Manganês	Zinco							
	mg dm ⁻³											
0,00-0,20	0,33	6,7	53	23,6	5,6							
0,20-0,40	0,31	5,5	42	21	4,6							

*ds: densidade do solo; CC: Capacidade de campo; PMP: Ponto de murcha permanente; θ: Umidade com base em volume (m³ m⁻³); SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V%: saturação por bases

A aveia-branca (cv. IAC 7) foi semeada no dia 09 de maio de 2017, na densidade de 80 kg ha⁻¹ e no espaçamento de 17 cm entre linhas, em área anteriormente cultivada com *Urochloa brizantha* cv. Marandu. A calagem foi realizada 30 dias antes da instalação do experimento, com dose de 1,5 t ha⁻¹ de calcário com PRNT igual a 80. O preparo de solo foi convencional, constituído de uma gradagem pesada e duas niveladoras. A adubação de semeadura foi realizada com 20 kg ha⁻¹ de N, 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 80 kg ha⁻¹ de K₂O. A adubação de cobertura com N foi realizada em função da demanda hídrica da cultura, através da aplicação de EETE.

As temperaturas máximas e mínimas médias para o período anterior ao florescimento e para o período após o florescimento foram de 26,4 °C e 13,8 °C e 27,2 °C e 13,1 °C, respectivamente (Figura 1A). A temperatura diária máxima observada foi de 33,6 °C, enquanto que a mínima foi de 7,2 °C.

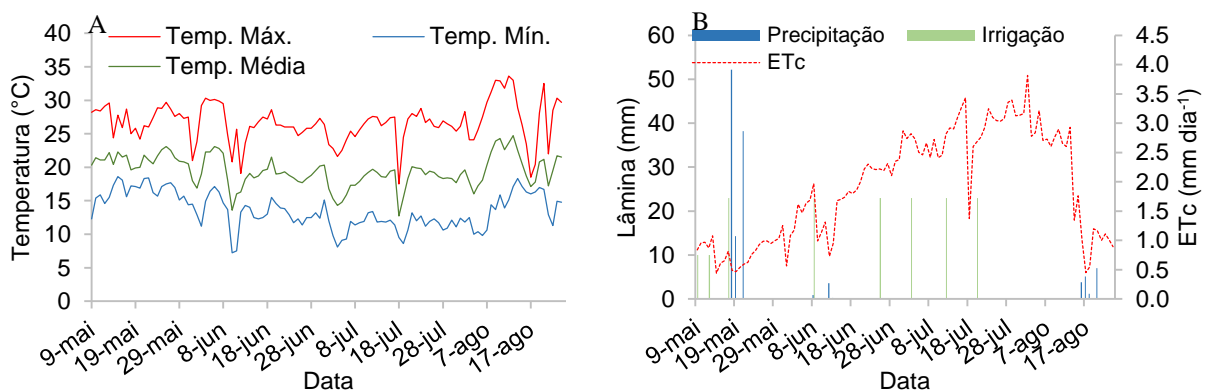


Figura 1. Temperaturas máximas, mínimas e médias diárias (A) e precipitação, evapotranspiração da cultura (ETc) e lâmina de irrigação diárias (B) para o período experimental de 09 de maio de 2017 a 24 de agosto de 2017

A ETc acumulada foi de 207,4 mm, com valor máximo de 3,82 mm dia⁻¹, enquanto que a precipitação acumulada foi de 126,6 mm. A lâmina aplicada, via irrigação, foi de 158 mm, sendo a quantidade aplicada de EETE proporcional aos níveis definidos pelos tratamentos (Figura 2). O maior volume de precipitações acumulou-se no início do desenvolvimento da cultura, tornando-se imprescindível a suplementação hídrica pela irrigação a fim de se obter rendimentos elevados.

As características físicas e químicas do EETE, para o cálculo da quantidade de nutrientes aplicados, foram: N_{total} = 60 mg L⁻¹, P = 4,4 mg L⁻¹, K = 14,6 mg L⁻¹, Ca =

12,2 mg L⁻¹, Mg = 3,9 mg L⁻¹, Fe_{Total} = 0,4 mg L⁻¹, Mn = 0,1 mg L⁻¹, Zn = 0,1 mg L⁻¹, Na = 52,0 mg L⁻¹, S-SO₄²⁻ = 19,3 mg L⁻¹, COT (carbono orgânico total) = 44,0 mg L⁻¹, pH = 7,3, condutividade elétrica (CE) = 0,48 dS m⁻¹.

Foi utilizado desenho experimental do tipo "linha de aspersores" com três linhas laterais, uma central para distribuir efluente de esgoto tratado (EETE) e duas externas para aplicar água (Figura 2). Esse desenho experimental possibilita distribuir a água de irrigação e EETE de tal forma que a lâmina aplicada seja uniforme no centro da área experimental, porém com taxas variáveis de aplicação do efluente (Lauer, 1983). Desta forma, a taxa de aplicação do efluente varia na direção perpendicular à linha de aspersores, de alta concentração, próximo da linha de aspersores que aplica EETE, até baixa concentração, próximo das linhas de aspersores que aplicam somente água (Figura 2).

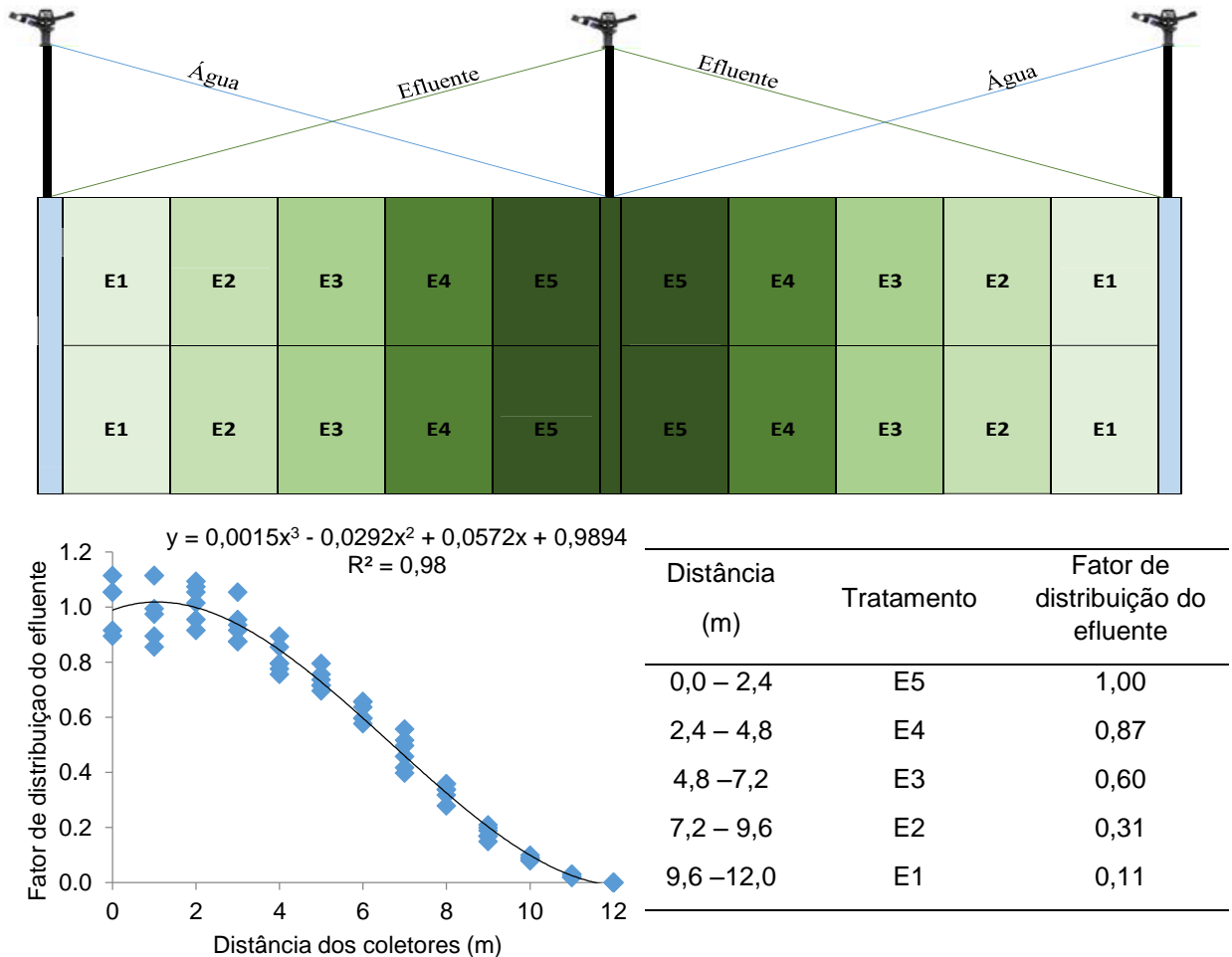


Figura 2. Croqui da área experimental e frações de distribuição da irrigação, obtidos em teste de campo, em função da distância ou tratamentos da linha de irrigação, com aspersores espaçados de 6 m na linha e 12 m entre linhas

Foram utilizados aspersores Senninger Modelo 3023-2 com bocais $\frac{3}{4}$ " M 08Qx05. O espaçamento de instalação foi de 6 m entre aspersores e 12 m entre linhas laterais. A intensidade de aplicação de água dos aspersores para o respectivo espaçamento foi medida em campo, obtendo-se taxa de 12 mm hora⁻¹. Foi determinado o coeficiente de uniformidade de aplicação (CUC) e distribuição (CUD) de água do sistema de irrigação, obtendo-se valores iguais a 89% e 84%, respectivamente. O fator de distribuição da precipitação dos aspersores foi determinado em campo, definindo os tratamentos de acordo com a Figura 2. As parcelas experimentais apresentaram 4,5 m de comprimento e 2,4 m de largura, totalizando uma área total para o experimento de 216 m² (24 m x 9 m). Os primeiros 50 cm iniciais de cada lado das parcelas foram considerados como bordadura.

O manejo da irrigação foi realizado com base na demanda hídrica da cultura, de acordo com o método FAO 56, utilizando dados climáticos obtidos diariamente na estação agrometeorológica automatizada da FCAV/Unesp. A evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada diariamente pela equação de Penman-Monteith (Allen et al. 1998). A evapotranspiração da cultura da aveia (ET_c) foi calculada pela pelo produto da ET_o com os coeficientes de cultura (K_c), de acordo com Allen et al. (1998).

A irrigação foi realizada sempre que o déficit hídrico do solo foi igual a 23 mm. Essa lâmina foi calculada em função dos coeficientes de cultura (K_c) da aveia-branca e dos atributos físicos do solo, com base nos limites de retenção de água no solo (Tabela 1). Para definição da lâmina de água evapotranspirada foi considerado profundidade efetiva de raízes de 40 cm e fator de disponibilidade de água no solo de 50% (Allen et al. 1998).

O sensor terrestre utilizado para obtenção do índice de vegetação foi o GreenSeeker HandHeld™, portátil. Destaca-se que esse sensor é ativo e gera automaticamente leituras de NDVI (Equação 1) a partir da medida da resposta espectral da banda do vermelho (650 nm) e do infravermelho próximo (770 nm). A medição com o GreenSeeker foi realizada manualmente, com passagem sobre a aveia-branca. As leituras em todos os tratamentos foi obtida a partir de uma altura média de 0,5 a 0,8 m entre o sensor e o alvo e realizada em 5,9 m² (9,8 m de deslocamento linear sobre a unidade experimental, multiplicado pela largura útil de

0,6 m captada pelo sensor), determinando-se um valor médio das 20 a 30 medições de NDVI obtidas na área em cada parcela.

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{r}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{r}}} \quad (1)$$

em que,

NDVI: índice de vegetação por diferença normalizada;

ρ_{nir} : reflectância no infravermelho próximo (770 nm);

ρ_{r} : reflectância no vermelho (650 nm).

As leituras de NDVI foram realizadas em 4 estádios fenológicos da cultura: aparecimento do pseudocaule (4), emborrachamento (8), aparecimento da bainha da folha bandeira (10) e grão aquoso (10.5.4), de acordo com a escala fenológica para cereais de inverno de Feeks & Large (Large, 1954). Cada repetição apresentou um valor médio de NDVI, sendo correlacionado à produtividade de grãos (PG), produtividade de biomassa (PB), altura de plantas, índice de área foliar (IAF) máximo, panículas m^{-2} , grãos panícula $^{-1}$ e massa de 1.000 grãos de cada parcela.

A PG da aveia-branca foi calculada colhendo-se uma área de 2 m^2 da parcela útil, padronizando-se a umidade dos grãos a 0,14 g g^{-1} . Para a obtenção da PB, 0,5 m^2 da parte aérea das plantas de cada parcela útil foi colhido e levado à estufa de circulação forçada, a 65 °C por 72 horas, para a obtenção da matéria seca. Utilizou-se o valor máximo do IAF na análise de correlação com as leituras de NDVI, sendo obtido no estádio de aparecimento da folha bandeira (10) da aveia-branca. O IAF foi determinado por método não destrutivo. A largura e comprimento das folhas de 5 plantas por parcela foram medidas e multiplicadas pelo fator 0,72. Esse fator foi determinado com base na área real da folha sobre a área definida pelo produto entre a largura e comprimento medidos (retângulo). A altura de plantas de cada parcela foi constituída pela média de 5 plantas. Os componentes de produtividade (panículas m^{-2} , grãos panícula $^{-1}$ e massa de 1000 grãos) foram determinados em área colhida de 0,5 m^2 por parcela.

As correlações entre as leituras de NDVI e os atributos de crescimento e rendimento da aveia-branca foram avaliadas pelo coeficiente de correlação de Pearson.

A definição das faixas de respostas dos índices para a produtividade da aveia-branca foi realizada conforme o trabalho de Vian et al. (2018). Nessa análise, foram plotados gráficos do NDVI em função da produtividade de biomassa relativa (PBR) para cada estágio fenológico avaliado. A PBR foi calculada em função da produtividade de biomassa média das 20 parcelas. A partir disso, foram definidas três faixas de zonas de manejo. A faixa de “Baixa”, “Média” ou “Alta” produtividade foram àquelas cujo índices geraram menos do que 90%, entre 90% e 110% e mais do que 110% da PBR, respectivamente.

Os dados foram submetidos à análise de variância (Teste F) e quando significativo, ao nível de 5% de probabilidade, foi aplicado o teste de comparação de médias de Duncan a 5% de probabilidade para comparação dos tratamentos.

2.3 Resultados e discussão

As quantidades de nutrientes e de sódio aplicadas em cada tratamento para a aveia-branca são discriminadas na Tabela 2. As quantidades aplicadas para os tratamentos E1, E2, E3 e E4 foram equivalentes a 11%, 31%, 60% e 87%, respectivamente, em relação ao tratamento E5, conforme definição dos tratamentos (Figura 2).

Tabela 2. Quantidades de nutrientes e de sódio aplicadas no solo (kg ha^{-1}) cultivado com aveia-branca para cada tratamento sob nível variável de efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE).

Quantidade aplicada (kg ha^{-1})	E1	E2	E3	E4	E5
N	10,43	29,39	56,88	82,48	94,80
P	0,77	2,17	4,20	6,09	7,00
K	2,54	7,15	13,84	20,07	23,07
Ca	2,12	5,98	11,58	16,79	19,30
Mg	0,67	1,89	3,66	5,31	6,10
S	1,12	3,16	6,12	8,87	10,20
Fe	0,06	0,16	0,30	0,44	0,50
Mn	0,01	0,03	0,06	0,09	0,10
Zn	0,02	0,06	0,12	0,17	0,20
Na	9,04	25,48	49,32	71,51	82,20

E1 – 11% de EETE; E2 – 31% de EETE; E3 – 60% de EETE; E4 – 87% de EETE; E5 – 100% de EETE; EETE – efluente de estação de tratamento de esgoto

Observa-se que após o N, o elemento com maior quantidade aplicada no solo via EETE foi o Na, podendo gerar riscos de salinização do solo. Entretanto, verifica-se que a aplicação de EETE apresenta pequeno risco de salinização do solo para a área experimental, conforme observado no estudo de Barbosa (2018), em que a autora verificou o efeito da aplicação do EETE em longo período nas propriedades químicas do mesmo solo do presente estudo.

As quantidades de N, P e K exportadas pela aveia-branca são próximas de 115 kg ha⁻¹, 13 kg ha⁻¹ e 150 kg ha⁻¹, respectivamente, para uma PG de 3,5 Mg ha⁻¹ (MALHI et al., 2006). A quantidade de P foi suprida totalmente e a de K em grande proporção via adubação de semeadura para todos os tratamentos, visto que as quantidades de P₂O₅ e K₂O aplicadas nessa situação foram de 160 kg ha⁻¹ (70 kg ha⁻¹ de P) e 80 kg ha⁻¹ (66 kg ha⁻¹ de K), respectivamente. Sendo assim, a quantidade de P e K aplicada em cobertura via EETE, em relação ao total aplicado para os tratamentos, foi menor para esses dois macronutrientes do que para o N, uma vez que para esse último a dose de semeadura foi de apenas 20 kg ha⁻¹.

A adubação de cobertura, via EETE, em função da demanda hídrica da cultura tem a vantagem de se aumentar a eficiência de adubação. Isso ocorre, pois, a maior demanda por nutrientes ocorre quando a planta apresenta maior necessidade de água, observando-se correlação positiva entre a curva de absorção de nutrientes e de necessidade hídrica das culturas (Somaweera et al., 2016). Devido a dinâmica dos nutrientes no solo, a possibilidade de aplicação parcelada de N via EETE apresenta vantagens, diminuindo as perdas e disponibilizando a maior quantidade do nutriente em estádios com maior demanda, conforme discutido anteriormente.

O número de panículas m⁻² variou de 439 a 507, porém não foi influenciado ($p > 0.05$) pelos níveis de EETE na lâmina de irrigação (Tabela 3). A altura de plantas foi influenciada pelos tratamentos, com o nível de EETE E1 apresentando menor altura do que os demais tratamentos, sendo o mesmo verificado para o número de grãos por panícula (NGP). Para a massa de 1.000 grãos (M1000) os tratamentos E4 e E5 foram inferiores aos demais. O índice de área foliar máximo (IAF máximo) foi maior para o tratamento E5, com valor 100% superior ao E1. Para a PG, os tratamentos E2 e E3 apresentaram maior média do que os demais, enquanto que a PB não foi influenciada pelos níveis de EETE.

Tabela 3. Comparação de médias de produtividade e de componentes de crescimento e rendimento da aveia-branca em função da aplicação de níveis de efluente de esgoto tratado e correlações entre as variáveis e as leituras de NDVI realizadas em estádios da cultura

Tratamento	Panículas (n° m ⁻²)	Altura (cm)	NGP (n° panícula ⁻¹)	M1000 (g)	IAF (máximo)	PG (kg ha ⁻¹)	PB (kg ha ⁻¹)
E1	439	118 B	36,88 B	63,8 A	4,06 C	4.693 B	15.356
E2	507	138 A	45,94 A	65,5 A	4,82 C	5.604 A	19.117
E3	502	142 A	45,25 A	62,9 A	6,01 B	5.803 A	19.068
E4	502	141 A	45,88 A	55,1 B	6,22 B	4.389 B	20.843
E5	490	137 A	46,75 A	50,6 B	8,13 A	3.905 B	20.804
F	0,30ns	6,00**	2,97*	163,33**	19,10**	9,70**	1,13ns
CV (%)	19,01	8,31	12,48	11,24	26,00	19,10	19,13
Estádio	Correlação das leituras de NDVI com componentes de rendimento						
4	0,10ns	0,73**	0,69*	0,30ns	0,86**	0,88**	0,74**
8	0,38ns	0,83**	0,83**	0,37ns	0,86**	0,90**	0,74**
10	0,39ns	0,91**	0,90**	0,28ns	0,86**	0,90**	0,85**
10.5.4	0,42ns	0,91**	0,88**	0,29ns	0,87**	0,94**	0,82**

NGP – número de grãos por panícula; M1000 – massa de 1000 grãos; PG – produtividade de grãos; PB – Produtividade de biomassa; E1 – 11% de EETE; E2 – 31% de EETE; E3 – 60% de EETE; E4 – 87% de EETE; E5 – 100% de EETE; *Significativo ao nível de 5% de probabilidade; **Significativo ao nível de 1% de probabilidade; ns-Não significativo; Letras iguais, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Duncan (5% de probabilidade). n°- número; Estádio 4 – início do aparecimento do pseudocaule; Estádio 8 – Início emborrachamento; Estádio 10 – Bainha da folha bandeira visível; Estádio 10.5.4 – Final do florescimento, grão aquoso.

A densidade de plantas é fator essencial na PG da aveia-branca. O número crescente de panículas m⁻² aumenta a PG da aveia-branca até certo limite (Dornelles et al., 2018), uma vez que elevadas densidades aumentam a competição intraespecífica entre os perfilhos. Para a cultivar IAC 7, a mesma utilizada nesse estudo, densidades entre 410 e 500 panículas m⁻² geram PG que variam entre 5.241 e 7.024 kg ha⁻¹ (Soratto et al., 2012), sendo essa faixa a observada para o número de panículas m⁻² no presente estudo.

Somente o tratamento E1 (11% de EETE) apresentou número de grãos por panícula inferior aos demais (p < 0,05). Como esse tratamento recebeu menor quantidade de EETE, a quantidade de nutrientes aplicada via EETE não supriu as necessidades da cultura, especialmente para o N, influenciando esse atributo de rendimento. Para o tratamento E1, a quantidade de N aplicada em cobertura foi de 10,4 kg ha⁻¹, valor 65% inferior ao aplicado no tratamento E2 (29,4 kg ha⁻¹) (Tabela 2),

justificando o menor número grãos por panícula em comparação aos demais tratamentos.

Geralmente, a massa de grãos é afetada somente quando ocorre déficit hídrico (Akram et al., 2013), fato não verificado no presente estudo. No entanto, no estágio de grão aquoso (10.5.4) ocorreu acamamento das plantas dos tratamentos E4 e E5, influenciando no enchimento de grãos, o que justifica as menores médias para esses tratamentos. Devido a maior altura de colmos desses tratamentos durante o ciclo da aveia, a irrigação realizada no estágio de grão aquoso (10.5.4) fez com que o peso da água sobre o dossel da aveia proporcionasse o acamamento das plantas nos tratamentos E4 e E5.

Devido ao acamamento das plantas, a altura nos tratamentos E4 e E5 não tiveram maiores médias para esses tratamentos na colheita da cultura (Tabela 3). Dessa maneira, observa-se que somente o tratamento E1 apresentou altura de plantas inferior aos demais ($p < 0,05$), fato provavelmente devido à pequena quantidade de nutrientes aplicada para esse tratamento. Uma maneira efetiva de controlar o acamamento da aveia-branca, sem interferir na sua produtividade, é a utilização de reguladores de crescimento (Marolli et al., 2017). Além disso, a utilização de genótipos de porte baixo e adaptados regionalmente pode diminuir o acamamento da cultura.

O tratamento E5 apresentou o maior valor de IAF máximo (8,13), sendo superior aos demais tratamentos ($p < 0,01$). Observa-se tendência crescente do IAF máximo em função das doses de N aplicadas em cobertura via EETE, com menores valores para o tratamento E1 e maior para o tratamento E5. Isso ocorre, pois doses crescentes de N promovem maior alongamento e comprimento das folhas, aumentando o IAF (Akmal et al., 2010).

Pela comparação de médias, o tratamento E3 (5.803 kg ha⁻¹) apresentou PG estatisticamente superior ao E1 (4.693 kg ha⁻¹), E4 (4.389 kg ha⁻¹) e E5 (3.905 kg ha⁻¹) e igual ao E2 (5604 kg ha⁻¹) ($p < 0,01$). A quantidade de N fornecida para a aveia-branca, via EETE, para o tratamento E3 e E2 foi de 57 kg ha⁻¹ e 29 kg ha⁻¹, respectivamente. Como não foi observada diferença estatística para a PG entre esses tratamentos, o EETE pode apresentar maior diluição em água (31% de EETE) sem apresentar redução no rendimento de grãos da aveia-branca. A vantagem da diluição

em água está no aumento da área irrigada por EETE. Além disso, a possibilidade da irrigação com EETE tem a vantagem de poder fornecer nutrientes para as plantas em estádios fenológicos críticos, diminuindo perdas de nutrientes por lixiviação (Santos et al., 2017a).

As correlações entre as leituras de NDVI e atributos de rendimento e crescimento da aveia só não foi significativa para o número de panículas m^{-2} e a massa de 1.000 grãos ($p > 0,05$). Como o acamamento dos tratamentos influenciou na massa de 1.000 grãos, foi utilizado somente as parcelas dos tratamentos E1, E2 e E3 (12 no total) para correlação desse atributo com os valores de NDVI. Entre estádios de avaliação, verifica-se que desde a primeira avaliação as correlações foram elevadas para a altura, número de grãos panícula⁻¹, IAF máximo, PG e PB. Entretanto, para a altura, número de grãos panícula⁻¹, PG e PB as maiores correlações foram observadas para os estádios 10 e 10.5.4 da cultura.

Como leituras de NDVI apresentam correlação direta com o acúmulo de nutrientes nas plantas, especialmente em relação a N (Santos et al., 2017b), é esperado elevadas correlações entre os atributos de rendimento e crescimento com os valores médios de NDVI, conforme observado no presente estudo. Plantas sem estresse nutricional apresentam maior altura e IAF do que quando sob deficiência (Wasternack, 2014). Além disso, a capacidade de produção dessas plantas aumenta, interferindo diretamente no número de grãos panícula⁻¹ (Soratto et al., 2012). Avaliações em estádios de máximo acúmulo de biomassa apresentam maior correlação e precisão na estimativa de atributos de rendimento das culturas (Wang et al., 2014). Como a necessidade nutricional é crescente com o decorrer do ciclo da cultura, até atingir um ponto máximo, geralmente deficiências nutricionais podem ser diagnosticadas por sensoriamento remoto com maior precisão em estádios próximos ao florescimento das culturas (Rhezali e Lahlali, 2017).

Devido aos comprimentos de onda emitidos pelo sensor ótico ativo, os valores de NDVI dão inferências do teor de clorofila presente nas folhas (Zarco-Tejada et al. 2013). O teor de clorofila é influenciado pela quantidade de N absorvida pelas plantas, no entanto, o consumo de luxo desse nutriente não interfere no teor de clorofila (Geng et al., 2014). Dessa maneira, a partir de uma determinada dose de N os valores de NDVI não apresentarão incrementos significativos, sendo essa a dose máxima de N

via EETE recomendada para a cultura avaliada, do ponto de vista técnico. Para o presente estudo, os valores máximos de NDVI observados para os estádios fenológicos 4, 8, 10 e 10.5.4 foram de 0,51, 0,84, 0,85 e 0,84 obtidos com as doses de N via EETE de 94,3 kg ha⁻¹, 73,3 kg ha⁻¹, 84,0 kg ha⁻¹ e 83,6 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 3). Como leituras de NDVI em estádios fenológicos mais avançados do ciclo das culturas apresentam maior correlação com a PG final (Rhezali e Lahlali, 2017), logo observa-se que a dose de N via EETE recomendada para a aveia-branca fica próxima a 85 kg ha⁻¹ (estádios 10 e 10.5.4).

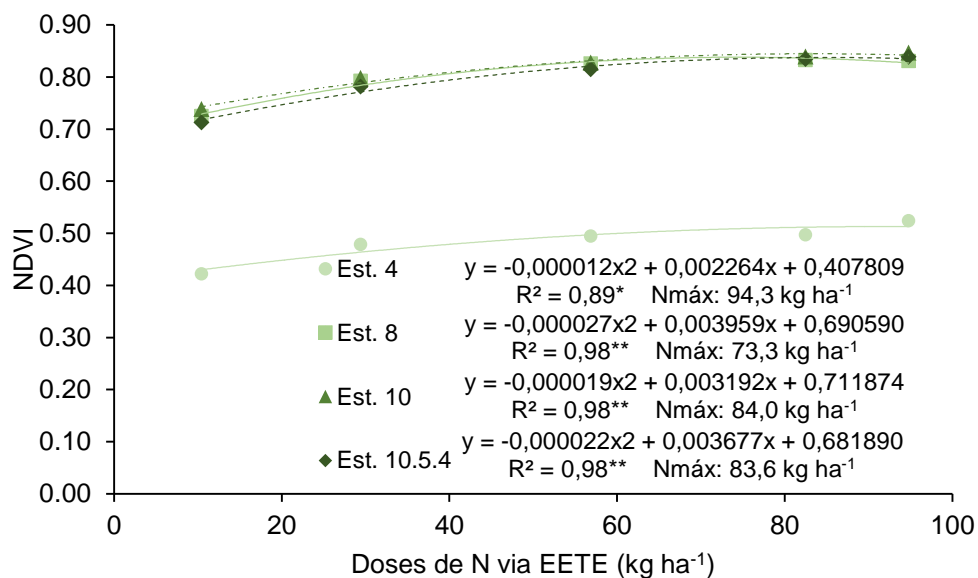


Figura 3. Variação dos valores de NDVI em função das doses de N fornecidas via EETE para a aveia-branca em quatro estádios fenológicos. *Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade

De acordo com os modelos (Figura 4A e 4B), os pontos máximos para a PG e PB da aveia-branca ocorreram para as doses de N, aplicada via EETE, de 45,3 kg ha⁻¹ e 88 kg ha⁻¹, respectivamente. Para a PB nota-se que a dose de N que garantiu a máxima PB (Figura 4), foi próxima da dose que garantiu o maior valor de NDVI (Figura 3). Como discutido anteriormente, o acamamento das parcelas dos tratamentos E4 e E5 reduziram a massa de grãos da aveia, interferindo diretamente na PG (Figura 4A). Dessa maneira, observa-se PG menor para esses tratamentos em relação aos demais. Até o tratamento E3, verifica-se tendência crescente da PG em relação às doses de N, por isso a máxima PG foi obtida em dose de N via EETE inferior à observada para a PB.

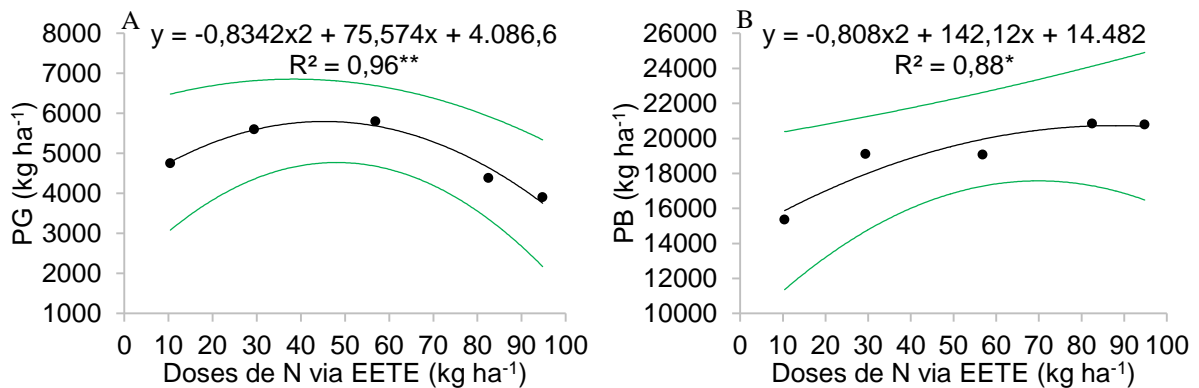


Figura 4. Modelos de estimativa da produtividade de grãos - PG (A) e biomassa - PB (B) da aveia-branca em função da dose de N aplicada em cobertura via efluente de esgoto tratado (EETE) com os respectivos intervalos de confiança (95% de probabilidade); *Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade

As doses de N fornecidas via EETE ideias obtidas no presente estudo para a obtenção da máxima PG e PB da aveia-branca dão indícios importantes para recomendações para a cultura. Quando a cultura for cultivada para a produção de grãos a dose de N aplicada via de EETE pode ser menor (45 kg ha⁻¹) do que quando a cultura for cultivada para a produção de forragem (88 kg ha⁻¹).

Não foi observado decréscimo da PB por ocasião do acamamento dos tratamentos E4 e E5. Como o acamamento ocorreu em estágio avançado do ciclo da cultura, praticamente toda a biomassa da cultura havia se acumulado. Pelas regressões, a PG e PB da aveia-branca sem aplicação de N em cobertura via EETE seria de 4.086,6 kg ha⁻¹ e 14.482 kg ha⁻¹, respectivamente.

Avaliando as doses de N mineral em cobertura para a aveia-branca sob dois sistemas de sucessão e em três anos, Silva et al. (2016) observaram que a dose de 60 kg ha⁻¹ de N é a mais indicada. Segundo os autores, a partir dessa dose a taxa de incremento da PG é mínima, independente do sistema de sucessão e se o ano é climaticamente favorável ou não para a aveia. Segundo os mesmos autores, a máxima diferença encontrada entre o rendimento de grãos para a dose de N de 60 kg ha⁻¹ e a máxima dose técnica recomendada (119 kg ha⁻¹) foi de apenas 348 kg ha⁻¹, inviabilizando economicamente a utilização de doses acima da recomendada no estudo. A dose recomendada pelos autores é próxima a dose do tratamento

observada no presente estudo ($E3 = 56.9 \text{ kg ha}^{-1}$) que garantiu a máxima PG da aveia-branca (5.803 kg ha^{-1}) (Figura 4).

O mesmo não foi observado para a PB, em que a dose máxima de N via EETE (88 kg ha^{-1}) que garantiu a máxima PB ($20.731 \text{ kg ha}^{-1}$) foi diferente da observada para a PG. Isso pode ter sido devido ao acamamento dos tratamentos E4 e E5 que reduziram suas PG. Entretanto, nem sempre a mesma dose de N que garante a máxima PG é a mesma que garante a máxima PB. A partir de determinado ponto, o incremento da adubação com N não aumenta significativamente o rendimento de grãos da aveia, mas a resposta para a PB pode ser significativa (SILVA et al., 2016). Sendo assim, a definição do uso da aveia-branca (grãos ou biomassa para pastejo) é essencial para o manejo da adubação via EETE nessa cultura.

Avaliando o crescimento do algodão sob aplicação de EETE e água em função da demanda hídrica da cultura, Bezerra e Fideles Filho (2009) observou maior área foliar e fitomassa das plantas irrigadas por EETE. Além disso, o maior crescimento obteve elevada correlação com os valores de NDVI. Rissini et al. (2015) observaram elevada correlação entre a produtividade do trigo e leituras de NDVI desde o início de desenvolvimento da cultura. De acordo com os autores, deve-se atentar em utilizar como padrão somente leituras realizadas no início do ciclo, uma vez que fatores bióticos e abióticos em fases mais adiantadas podem comprometer o rendimento de grãos e biomassa.

Na definição dos limites críticos de NDVI na cultura da aveia-branca, observa-se que todas as regressões geradas foram significativas, independentemente do estágio fenológico (Figura 5). A maior precisão de ajuste foi para os estágios fenológicos mais avançados, com maior valor do coeficiente de determinação (R^2) para o estágio 10.5.4. Dessa forma, recomenda-se que a definição de zonas de manejo de aplicação de EETE em função dos valores críticos de NDVI da aveia-branca sejam realizadas em estágios fenológicos próximos ao florescimento da cultura, obtendo-se maior precisão.

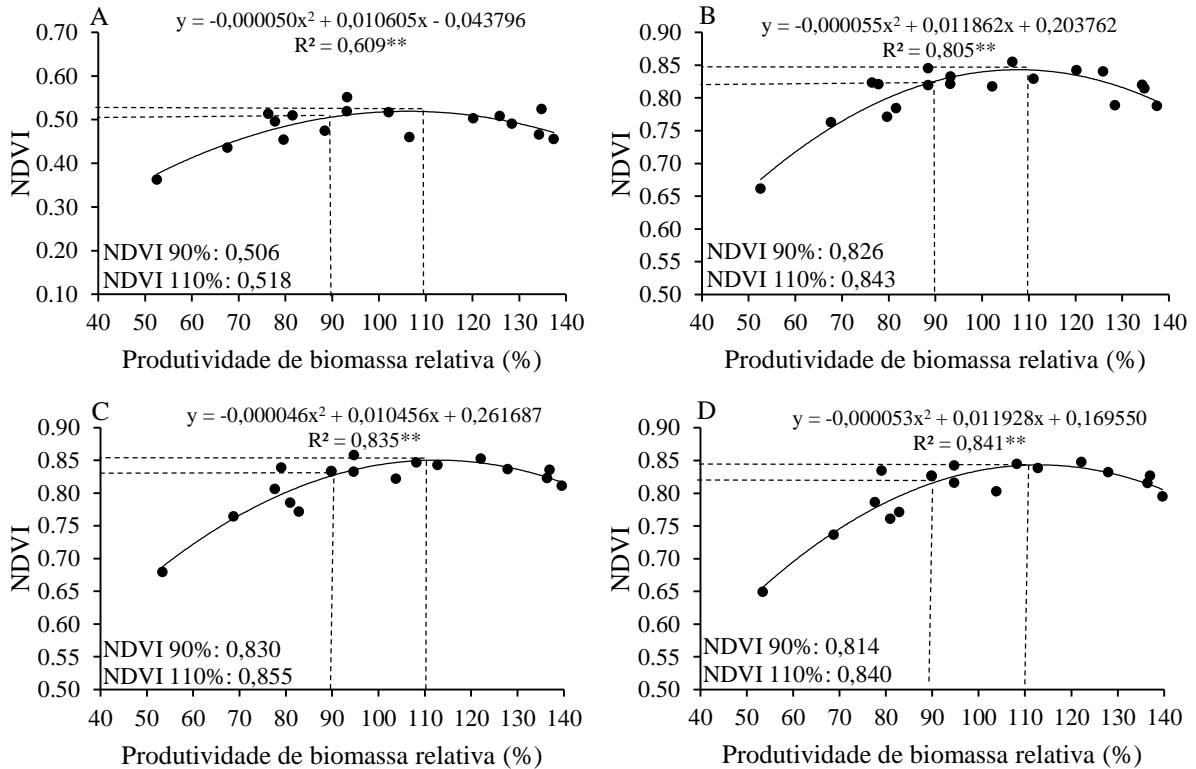


Figura 5. Definição de faixas críticas de NDVI para a aveia branca nos estádios fenológicos 4 (A), 8 (B), 10 (C) e 10.5.4 (10.5.4) de acordo com a escala fenológica de Feeks e Large (LARGE, 1954). **Significativo a 1% de probabilidade

Devido à maior variabilidade interanual dos valores de NDVI em estádios fenológicos iniciais das culturas (Grohs et al., 2011), quando comparado ao mais tardios, a utilização de limites críticos determinados no início do desenvolvimento das culturas pode levar a menor precisão. Além disso, verifica-se que para cereais de inverno, a definição dos valores críticos em função da PG pode apresentar maior variação do que em função da PB, uma vez que a PG apresenta maior variação interanual com os mesmos valores de NDVI do que a PB (Grohs et al., 2011). Em lavouras irrigadas, como para o presente estudo, isso se deve especialmente ao clima, em que fatores como temperatura e radiação afetam mais o processo de florescimento e enchimento de grãos das culturas do que o acúmulo de biomassa (Silva et al., 2016).

Comparando a outros cereais de inverno como trigo e a cevada, verifica-se que os limites críticos para a obtenção de classes de elevada produtividade no estágio fenológico 8 são próximos ao observado para a aveia no presente estudo. Para o trigo e a cevada o limite crítico de NDVI para elevadas produtividades variou entre 0,80 e

0,83 (Grohs et al., 2009), valores esses dependentes da cultura de verão antecessora e muito próximos ao observado no presente estudo para o mesmo estágio (0,84). Isso indica que para cereais de inverno não existem grandes variações dos valores críticos de NDVI para a obtenção de elevadas produtividades, fato que pode ser devido à semelhança de cultivo e de crescimento das espécies e comprovado pelo estudo de Grohs et al. (2009), uma vez que os autores não necessitaram de modelos individuais para cada espécie na definição dos limites críticos.

Com as classes de produtividades definidas em função dos limites críticos de NDVI, práticas de manejo como irrigação e adubação nitrogenada em taxa variável pode ser realizada. Isso pode ser feito adotando-se para a classe de “Alta” produtividade a quantidade de água que fornece 100% da ETc e a dose padrão do fertilizante recomendada para a cultura, aumentando-se percentualmente esse valor para as classes de “Média” e “Baixa” produtividade. Além disso, é necessário a definição de modelos da variação dos valores de NDVI em função do nível de irrigação e de doses de N para cada cultura.

Para o presente estudo, observa-se para o estágio 10.5.4 que para elevar o valor de NDVI da aveia de 0,80 para 0,84, passando da classe de produtividade “Baixa” para “Alta”, é necessário dose de N equivalente a 40 kg ha^{-1} , de acordo com equação definida na Figura 3. A partir disso, pode-se calcular as doses de N para cada zona de manejo definida pelas classes de produtividade (Figura 5), em que àquelas com “Baixa” produtividade deverão receber 40 kg ha^{-1} a mais de N da recomendação padrão para a cultura, podendo passar da classe de “Baixa” produtividade para a de “Alta”. Sendo assim, além da definição dos valores críticos de NDVI para a culturas, deve-se obter o modelo de variação de NDVI em função de doses de N, recomendando corretamente as doses de fertilizantes nitrogenados para adubação em taxa variável.

2.4 Conclusões

Recomenda-se para a aveia-branca destinada para a produção de grãos e de forragem doses de N fornecidas via EETE de 45 kg ha^{-1} e 88 kg ha^{-1} , respectivamente. Leituras de NDVI apresentam elevada correlação ($r > 0,80$) com os atributos de crescimento e de produtividade da aveia-branca, com maiores correlações obtidas em

estádios fenológicos próximos ao florescimento da cultura (10 e 10.5.4). A definição dos limites críticos de NDVI da aveia-branca apresentou maior precisão no estágio fenológico 10.5.4, com a classe de produtividade “Baixa” correspondendo a valores de NDVI menores do que 0,814, a “Média” entre 0,814 e 0,840 e a de “Alta” produtividade com valores superiores a 0,840.

2.5 Referências

Akmal M, Rehman H, Farhatullah MA, Akbar H (2010) Response of maize varieties to nitrogen application for leaf area profile, crop growth, yield and yield components. **Pakistan Journal of Botany** 42:1941-1947.

Akram HM, Ali A, Sattar A, Rehman HSU, Bibi A (2013) Impact of water deficit stress on various physiological and agronomic traits of three basmati rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. **Journal of Animal and Plant Sciences** 23:1415-1423.

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration - **Guidelines for computing crop water requirements** Rome: FAO. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 56).

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G (2013) Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22:711-728.

Andrews DM, Robb T, Elliott H, Watson JE (2016) Impact of long-term wastewater irrigation on the physicochemical properties of humid region soils: “The Living Filter” site case study. **Agricultural Water Management** 178:239-247.

Barbosa AMDS (2018) **Risco de contaminação ambiental em um Latossolo de região úmida devido à aplicação de efluente de esgoto tratado**. 74 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Unesp, Jaboticabal.

Bezerra BG, Fideles Filho JF (2009). Análise de crescimento da cultura do algodoeiro irrigada com águas residuárias. **Revista Ciência Agrônômica** 40:339-345.

Cai T, Park SY, Li Y (2013) Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: status and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 19:360-369.

Chepulis L, Hill S, Mearns G (2017) The nutritional quality of New Zealand breakfast cereals: an update. **Public Health Nutrition** 20: 3234-3237.

CONAB. Companhia nacional de abastecimento (2018) Acompanhamento da safra brasileira: grãos. Quinto Levantamento, 5(5) 142p. fevereiro/2018. CONAB, Brasília.

Damian JM, Santi AL, Fornari M, Da Ros CO, Eschner VL (2017) Monitoring variability in cash-crop yield caused by previous cultivation of a cover crop under a no-tillage system. **Computers and Electronics in Agriculture** 142:607-621.

Dornelles EF, Kraisig AR, Silva JA, Sawicki S, Roos-Frantz F, Carbonera R (2018) Artificial intelligence in seeding density optimization and yield simulation for oat. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 22:183-188.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Brasília, 353 p.

Fortes Neto P, Veiga PGA, Fortes NLP, Targa MS, Gadioli JL, Peixoto PHM (2013) Alterações químicas do solo e produção de aveia fertilizada com água residuária do tratamento de esgoto sanitário. **Ambiente & Água** 8:71-83.

Geng X, Guillard K, Mangiafico SS, Morris TF (2014) Defining sufficiency levels of nitrogen in cool-season turfgrass lawns using Macy's concept. **Crop Science** 54:1844-1858.

Gonçalves IZ, Barbosa EAA, Santos LDS, Nazário AA, Feitosa DRC, Tuta NF, Matsura, EE (2017) Water relations and productivity of sugarcane irrigated with domestic wastewater by subsurface drip. **Agricultural Water Management** 185:105-115.

Grohs DS, Bredemeier C, Mundstock CM, Poletto N (2009) Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola** 29: 101-112.

Grohs DS, Bredemeier C, Poletto N, Mundstock CM (2011) Validação de modelo para predição do potencial produtivo de trigo com sensor óptico ativo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 46:446-449.

Jat H, Kaushik MK, Nepalia V, Singh D (2017) Effect of irrigation schedule and nitrogen fertilization on growth, yield and quality of fodder oat (*Avena sativa* L.). **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry** 6:2040-2042.

Large EC (1954) Growth stages in cereals illustration of the Feekes scale. **Plant pathology** 3:128-129.

Lauer DA (1983) Line-Source Sprinkler Systems for Experimentation with Sprinkler-Applied Nitrogen Fertilizers 1. **Soil Science Society of America Journal** 47:124-128.

Malhi SS, Johnston AM, Schoenau JJ, Wang ZL, Vera CL (2006) Seasonal biomass accumulation and nutrient uptake of wheat, barley and oat on a Black Chernozem soil in Saskatchewan. **Canadian Journal of Plant Science** 86:1005-1014.

Marolli A, Silva JA, Romitti MV, Mantai RD, Hawerroth MC, Scremin OB (2017) Biomass and grain yield of oats by growth regulator. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 21:163-168.

Panasiewicz K, Koziara W, Faligowska A (2017) Response of three oat forms to sprinkling irrigation and nitrogen fertilization. **Turkish Journal of Field Crops** 22:81-88.

Rhezali A, Lahlali R (2017) Nitrogen (N) Mineral Nutrition and Imaging Sensors for Determining N Status and Requirements of Maize. **Journal of Imaging** 3:51-60.

Rissini AL, Kawakami J, Genú AM (2015) Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:1703-1715.

Rosa DM, Sampaio SC, Pereira PA, Reis RRD, Sbizzaro M (2017) Corn fertilization using swine wastewater and soil-water environmental quality. **Engenharia Agrícola** 37:801-810.

Santos GO, Faria RTD, Rodriguês GA, Dantas GDF, Dalri AB, Palaretti LF (2017a) Forage yield and quality of marandugrass fertigated with treated sewage wastewater and mineral fertilizer. **Acta Scientiarum. Agronomy** 39:515-523.

Santos GO, Rosalen DL, Faria RT (2017b) Use of active optical sensor in the characteristics analysis of the fertigated brachiaria with treated sewage. **Engenharia Agrícola** 37:1213-1221.

Silva JA, Goi Neto CJ, Fernandes SB, Mantai RD, Scremin OB, Pretto R (2016) Nitrogen efficiency in oats on grain yield with stability. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 20:1095-1100.

Somaweera KATN, Suriyagoda LDB, Sirisena DN, De Costa WAJM (2016) Accumulation and partitioning of biomass, nitrogen, phosphorus and potassium among different tissues during the life cycle of rice grown under different water management regimes. **Plant and soil** 401:169-183.

Soratto RP, Crusciol CAC, Castro GSA, Costa CHMD, Ferrari Neto J (2012) Leaf application of silicic acid to white oat and wheat. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36:1538-1544.

Sultana SR, Ali A, Ahmad A, Mubeen M, Zia-UI-Haq M, Ahmad S, Jaafar HZ (2014) Normalized Difference vegetation index as a tool for wheat yield estimation: A case study from Faisalabad, Pakistan. **The Scientific World Journal** 2014:1-8.

USDA. United States Department of Agriculture (2018) **World Agricultural Production**. Circular Series. WAP 2-18, February. Disponível em:<<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>> Acesso em 20 fev. de 2018.

Vian AL, Bredemeier C, Silva PRF, Santi AL, Giordano CPDS (2018) Limites críticos de NDVI para estimativa do potencial produtivo do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo** 17:91-100.

Wang L, Tian Y, Yao X, Zhu Y, Cao W (2014) Predicting grain yield and protein content in wheat by fusing multi-sensor and multi-temporal remote-sensing images. **Field Crops Research** 164:178-188.

Wasternack C (2014) Action of jasmonates in plant stress responses and development—applied aspects. **Biotechnology advances** 32:31-39.

Zarco-Tejada PJ, González-Dugo V, Williams LE, Suárez L, Berni JÁ, Goldhamer D, Fereres E (2013). A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll

effects: Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. **Remote sensing of environment** 138:38-50.

CAPÍTULO 3 - Desempenho de modelos de estimativa da produtividade de aveia-branca, cultivada sob níveis de irrigação, em função de índices de vegetação²

RESUMO: Modelos para a estimativa da produtividade de culturas em função de índices de vegetação são muito utilizados na agricultura, entretanto a capacidade de generalização dos modelos é pouco estudada. Objetivou-se avaliar a capacidade de generalização de modelos de estimativa da produtividade de grãos (PG) e de biomassa (PB) da aveia-branca em função de dois índices de vegetação (NDVI e IRVI) e indicar o melhor estágio fenológico para a avaliação. A aveia-branca foi cultivada em dois anos agrícolas (2017 e 2018) sob cinco tratamentos, constituídos por níveis de irrigação (11%, 31%, 60%, 87% e 100% da evapotranspiração da cultura). Obtiveram-se os índices médios de NDVI e IRVI na cultura por sensor terrestre ativo (GreenSeeker) em 4 estádios fenológicos. A calibração do modelo foi realizada com os dados experimentais de 2017 para cada estágio fenológico, sendo os valores de NDVI e IRVI correlacionados com a produtividade de biomassa e produtividade de grãos para se obter equações de regressão. Para a validação dos modelos calibrados em 2017, foram utilizados os dados experimentais de 2018. Os ajustes foram testados por análise de variância (Teste F) e a acurácia verificada pelos índices estatísticos de coeficiente de determinação (R^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro médio (MBE). Independentemente do índice de vegetação utilizado, os modelos apresentaram boa capacidade de generalização, com maior acurácia para a estimativa da PB da aveia-branca. Modelos calibrados em função do índice de vegetação IRVI e em estádios fenológicos próximos ao florescimento da cultura apresentaram maior acurácia de estimativa.

Palavras-chave: biomassa, geotecnologia, greenseeker, IRVI, NDVI, produtividade de grãos

3.1 Introdução

A cultura da aveia-branca é uma excelente opção agrícola para cultivo no inverno brasileiro devido a sua multiplicidade de usos. Pode ser utilizada para produção de palhada em sistema de plantio direto, pastejo direto, produção de feno ou silagem como também para a produção de grãos. Como grande parte do território brasileiro apresenta o inverno seco, a água exerce papel fundamental na produtividade desta cultura. Sob irrigação, verifica-se aumentos de biomassa e de produtividade de grãos de até 37% e 52%, respectivamente (Jat et al., 2017; Panasiewicz et al., 2017).

² Este capítulo corresponde ao artigo científico publicado na revista Pesquisa Agropecuária Tropical 48:109-117, 2018.

O estado fisiológico das culturas agrícolas pode ser identificado por sensoriamento remoto (Ihuoma e Madramootoo, 2017). Diversos sensores e índices podem ser utilizados para o manejo da irrigação e adubação em taxa variável, apresentando baixo custo e elevada viabilidade (Ihuoma e Madramootoo, 2017). Existem índices estruturais, de clorofila, fotoquímicos e indicadores termais (Zarco-Tejada et al., 2013). Dentre os índices mais conhecidos estão os estruturais, no qual estão inseridos os índices de vegetação Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse et al., 1974), Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI) (CHEN, 1996), Reverse Vegetation Index (RVI) e Inverse Ratio Vegetation Index (IRVI) (Richardson e Wiegand, 1977).

A avaliação dos índices de vegetação permite identificar o estado nutricional das plantas, especialmente em relação ao nitrogênio (Santos, et al. 2017; Zhao, et al. 2018). Como os valores desses índices variam conforme o estágio da cultura, a definição do coeficiente de cultura (K_c) para manejo da irrigação também pode ser realizado (Kamble et al., 2013). Outras aplicações desses índices são estimativas de produtividade, acúmulo de biomassa, teor de proteína, adubação nitrogenada e controle de plantas daninhas (Yao et al., 2012; Kapp Júnior et al., 2016; Pantazi et al., 2016).

A acurácia de predição de atributos de rendimento e tecnológicos das culturas utilizando índices de vegetação é variável em função de diversos fatores como, o clima da região, a cultura, o estágio fenológico de avaliação e até mesmo o índice utilizado (Bredemeier et al., 2013; Bolton e Friedl, 2013). As leituras de NDVI podem ser insensíveis ao aumento de biomassa da cultura quando existe grande cobertura do solo pelo dossel vegetal (Povh et al., 2008). Com isso, a avaliação de outros índices com relação simples, como o IRVI, podem ser mais acurada para a predição do rendimento das culturas em determinadas ocasiões (Li et al., 2010). Dessa maneira, é fundamental a definição do melhor estágio da cultura para a avaliação utilizando geotecnologias, em função de evitar maior cobertura do solo e, conseqüentemente, a saturação do índice. Além disso, outro fato importante é avaliar qual índice é o mais adequado, proporcionando melhor acurácia em relação às variáveis agrônômicas a serem determinadas.

A partir dos valores de índices de vegetação e da produtividade, modelos podem ser calibrados para estimarem os atributos agrônômicos de diversas culturas (Santos et al., 2017). A calibração dos modelos é passo essencial na estimativa da produtividade das culturas. Definir o melhor estágio fenológico e índice que garantem maior precisão irão interferir na tomada de decisão pelo produtor, podendo ser tanto para o gerenciamento da produção como no manejo agrícola dos próximos cultivos. Contudo, a validação dos modelos é fator ainda mais importante, pois é através dela que se garante a capacidade de generalização dos modelos. Devido às variações interanuais e temporais dos índices, os modelos podem apresentar grandes variações de acurácia, especialmente em estádios fenológicos iniciais (Raun et al., 2005). A avaliação da utilização do sensoriamento remoto na aveia-branca é essencial, pois pouco se sabe sobre a acurácia dos índices de vegetação nessa cultura, diferentemente de outros cereais de inverno como o trigo e a cevada.

Objetivou-se avaliar a capacidade de generalização de modelos de estimativa da produtividade de grãos e de biomassa da aveia-branca em função de dois índices de vegetação (NDVI e IRVI) e indicar o melhor estágio fenológico para a avaliação.

3.2 Material e métodos

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp, Jaboticabal, SP (latitude 21°14'44" S, longitude 48°17'00" W e altitude de 545 m). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, subtropical, relativamente seco no inverno, com chuvas de verão, apresentando temperatura média anual de 22°C e precipitação anual normal de 1.424 mm (Alvares et al., 2013). O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho eutrófico (EMBRAPA, 2013), cujos atributos físicos e químicos (Raij et al., 2002) são apresentadas na Tabela 1.

Os dados para a calibração dos modelos foram referentes a experimento de campo conduzido em 2017 e para a validação dos mesmos em experimento conduzido em 2018. Em 2017, a aveia-branca (cv. IAC 7) foi semeada no dia 09 de maio, enquanto que em 2018 no dia 02 de maio. Utilizou-se densidade de semeadura de 80 kg ha⁻¹ de sementes, utilizando sementes com germinação de 95% e no

espaçamento de 17 cm entre linhas, em área anteriormente cultivada com *Urochloa brizantha* cv. Marandu. A calagem foi realizada 30 dias antes da instalação dos experimentos, com dose de 1,5 t ha⁻¹ de calcário com PRNT igual a 80. A adubação de plantio foi: 20 kg ha⁻¹ de N, 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 160 kg ha⁻¹ de K₂O. A adubação de cobertura foi realizada somente com N (ureia), na dose de 100 kg ha⁻¹ e parcelada em duas vezes, a primeira no perfilhamento da aveia (60% da dose) e a segunda na fase de emborrachamento (40% da dose) (Escosteguy et al., 2014). Todos os manejos agrícolas foram iguais nos dois anos de avaliação.

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo da área experimental

Camada (m)	ds* (kg m ⁻³)	θ* CC* (m ³ m ⁻³)	θ* PMP* (m ³ m ⁻³)	Areia total	Argila	Silte	Textura do solo					
					(g kg ⁻¹)							
0,00-0,20	1,45	0,45	0,33	310	470	220	Argiloso					
0,20-0,40	1,49	0,41	0,30	270	530	200	Argiloso					
Camada (m)	pH CaCl ₂	M.O. (g dm ⁻³)	P _{resina} (mg dm ⁻³)	S	H+Al	Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
					(mmol _c dm ⁻³)							
0,00-0,20	5,6	40	67	5	21	1	3,4	36	13	52,7	73,9	71
0,20-0,40	5,8	40	68	5	20	1	3,2	36	11	50,3	70,4	71
Camada (m)	Boro		Cobre		Ferro	Manganês		Zinco				
					mg dm ⁻³							
0,00-0,20	0,33		6,7		53	23,6		5,6				
0,20-0,40	0,31		5,5		42	21		4,6				

*ds: densidade do solo; CC: Capacidade de campo; PMP: Ponto de murcha permanente; θ: Umidade com base em volume (m³ m⁻³); SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V%: saturação por bases

Para a definição dos tratamentos, foi utilizado um desenho experimental do tipo "linha central de aspersores". Esse desenho experimental possibilita distribuir a água de irrigação com níveis variáveis de aplicação à medida que o tratamento se afasta da linha central de aspersores (Lauer, 1983). Em teste de campo definiram-se também as frações de distribuição da precipitação dos aspersores (Figura 1).

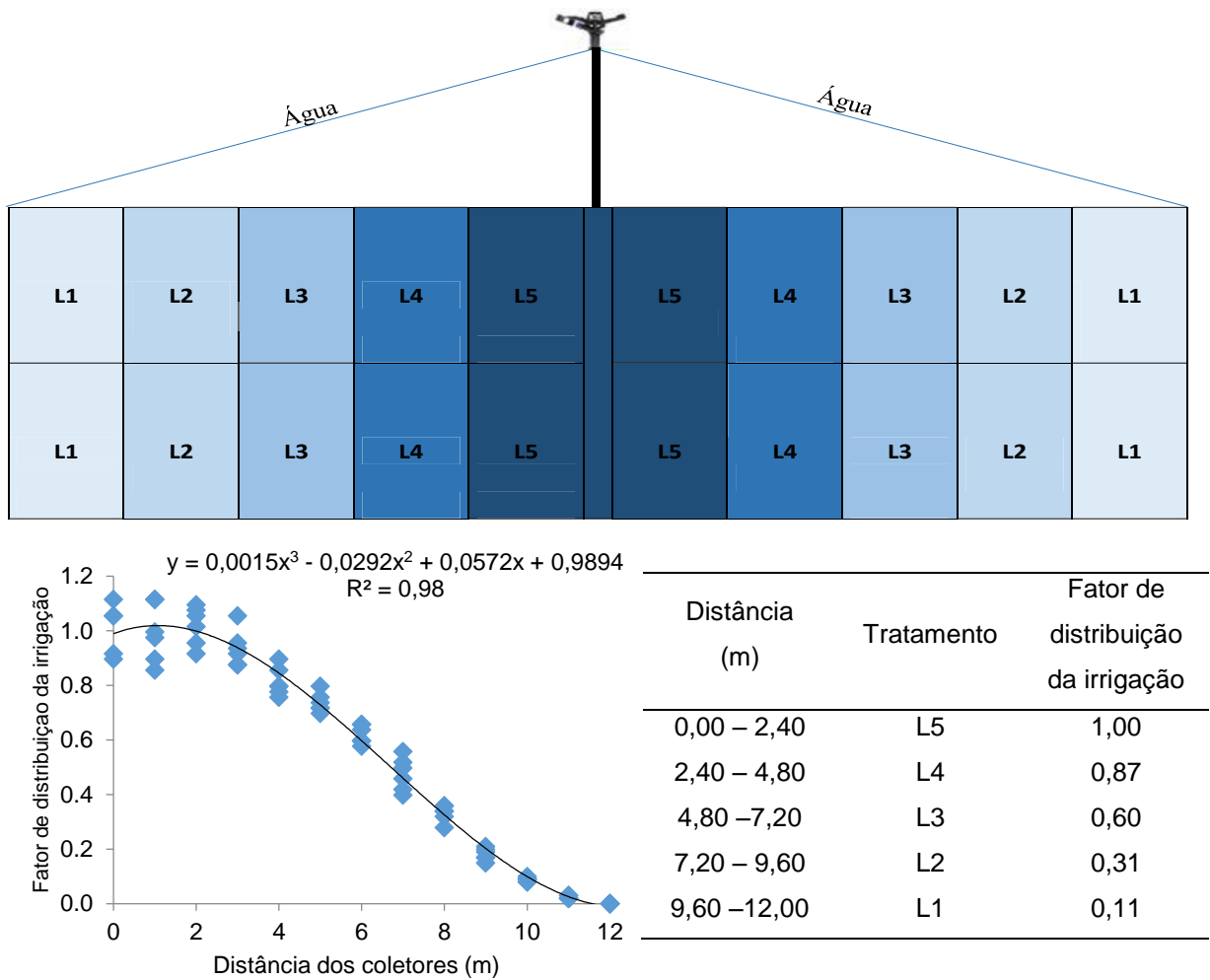


Figura 1. Croqui da área experimental e frações de distribuição da precipitação dos aspersores em função da distância ou tratamentos da linha de irrigação, com aspersores espaçados de 6 m na linha, obtidos em teste de campo.

Foram utilizados aspersores Senninger Modelo 3023-2 e bocais 3/4" M 08Qx05, espaçados a cada 6 m na linha central. A intensidade de aplicação de água dos aspersores foi medida em campo, em testes com coletores, obtendo-se taxa de 12 mm hora⁻¹ para o maior nível de irrigação. Para efeito de estudo, os tratamentos foram constituídos de cinco níveis de irrigação: L1, L2, L3, L4 e L5 que receberam 11%, 31%, 60%, 87% e 100% respectivamente, da quantidade de água evapotranspirada pela cultura (ETc). Os tratamentos foram distribuídos em delineamento experimental de blocos em faixas, com quatro repetições.

O fator de distribuição da precipitação dos aspersores foi definido em teste de coletores, determinando os tratamentos de acordo com a Figura 1. Nesse teste, foram colocados coletores espaçados de 1 m, até a distância limite de aplicação de água

pelos aspersores, em linha perpendicular à linha de irrigação, com 4 repetições. Após isso, a aplicação de água pelos aspersores em função da distância dos coletores foi modelada conforme a Figura 1. As parcelas experimentais apresentaram 4,5 m de comprimento e 2,4 m de largura, totalizando uma área total para o experimento de 216 m² (24 m × 9 m). Os primeiros 0,50 m iniciais de cada lado das parcelas foram considerados como bordadura.

O manejo da irrigação foi realizado com base na demanda hídrica da cultura, de acordo com o método FAO 56, utilizando dados climáticos obtidos diariamente na estação agrometeorológica automatizada da FCAV/Unesp. A evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada diariamente pela equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). A evapotranspiração da cultura da aveia (ET_c) foi calculada pelo produto da ET_o com os coeficientes de cultura (K_c), de acordo com Allen et al. (1998).

A irrigação sempre foi realizada quando o déficit hídrico na área foi igual a 23 mm. Essa lâmina foi calculada em função dos estádios fenológicos da aveia e dos atributos físicos do solo (Tabela 1). Para o cálculo foi utilizado profundidade efetiva de raízes de 40 cm e fator de disponibilidade de água no solo de 50% (Allen et al., 1998).

As temperaturas máximas e mínimas médias, bem como a média para o período experimental do ano de 2017 foram de 26,8 °C, 13,5 °C e 19,6 °C, respectivamente (Figura 2A). Para o período experimental do ano de 2018 as temperaturas máximas e mínimas médias, bem como a média para o período foram de 28,2 °C, 14,2 °C e 20,6 °C, respectivamente (Figura 2C).

A precipitação e ET_c acumuladas para o ciclo da aveia em 2017 foram de 126,6 mm e 207,4 mm, respectivamente (Figura 2B). A lâmina de irrigação para o tratamento com 100% da ET_c (L5) foi de 158 mm, com os valores variando na mesma proporção da taxa de aplicação de água para os demais tratamentos (Figura 1). Em 2018, a precipitação e ET_c acumuladas para o ciclo da aveia foram de 50,9 mm e 170,6 mm, respectivamente (Figura 2D). A lâmina de irrigação para o tratamento com 100% da ET_c (L5) foi de 140 mm, com os valores variando na mesma proporção da taxa de aplicação de água para os demais tratamentos (Figura 1). Para os dois anos a irrigação foi realizada até o estágio de grão aquoso da aveia-branca (10.5.4).

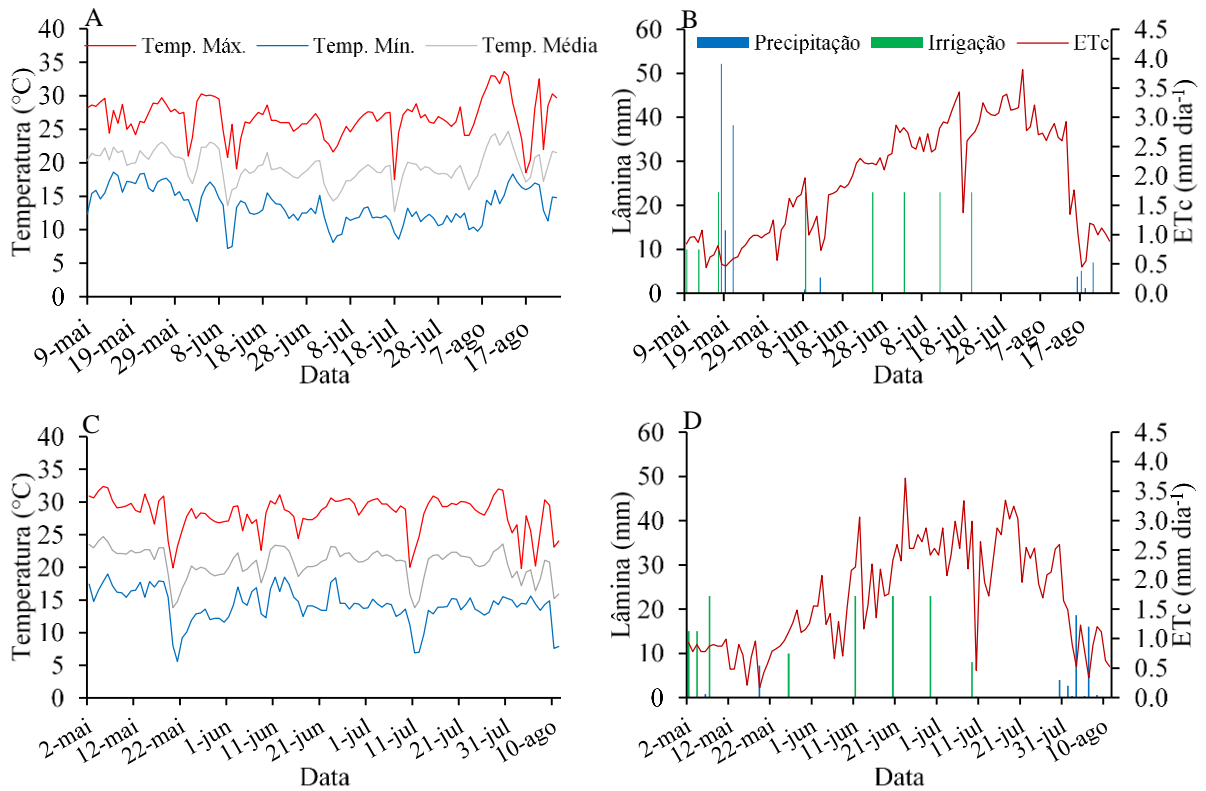


Figura 2. Temperaturas máximas, mínimas e médias diárias (A e C) e precipitação, ETc e lâmina de irrigação diárias (B e D) para o ano agrícola de 2017 (A e B) e de 2018 (C e D)

O sensor terrestre utilizado foi o GreenSeeker HandHeld™, portátil. Destaca-se que esse sensor é ativo e gera automaticamente dois índices de vegetação, o NDVI (Equação 1) e o IRVI (Equação 2), a partir da medida da resposta espectral da banda do vermelho (650 nm) e do infravermelho próximo (770 nm). A obtenção de dados com o GreenSeeker foi realizada manualmente, com passagem sobre o dossel (0,5 m acima) da aveia-branca. A área amostrada por parcela foi de 5,9 m², correspondente a 9,8 m de deslocamento pela largura útil de 0,6 m captada pelo sensor, gerando-se valor médio das 20 a 30 medições de NDVI (Equação 1) e IRVI (Equação 2) por repetição. A calibração do GreenSeeker foi realizada sempre em solo sem vegetação.

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{r}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{r}}} \quad (1)$$

$$\text{IRVI} = \frac{\rho_{\text{r}}}{\rho_{\text{nir}}} \quad (2)$$

Em que,

NDVI: índice de vegetação por diferença normalizada;
IRVI: razão inversa do índice de vegetação;
pnir: reflectância no infravermelho próximo (770 nm);
pr: reflectância no vermelho (650 nm).

As leituras de NDVI e IRVI foram realizadas em 4 estádios fenológicos da cultura: aparecimento do pseudocaule (4), emborrachamento (8), aparecimento da bainha da folha bandeira (10) e grão aquoso (10.5.4), de acordo com a escala fenológica para cereais de inverno de Feeks & Large (Large, 1954). Cada repetição apresentou um valor médio de NDVI e IRVI, sendo correlacionados à produtividade de grãos (PG) e de biomassa (PB) de cada parcela para calibração e validação das regressões lineares simples.

A PG da aveia-branca foi calculada colhendo-se em cada parcela uma área de 2 m². A umidade dos grãos foi padronizada a 0,14 g g⁻¹ para o cálculo da produtividade. Para a obtenção da PB, 0,5 m² da parte aérea das plantas de cada parcela útil foi colhido e levado à estufa de circulação forçada, a 65 °C por 72 horas, para a obtenção da matéria seca.

Foram gerados modelos para a estimativa da PG e PB da aveia-branca em função dos índices de vegetação NDVI e IRVI para leituras realizadas em quatro estádios fenológicos da cultura. Os dados obtidos no experimento de 2017 foram utilizados para a definição (calibração) das equações. As equações obtidas na fase calibração (2017) foram aplicadas aos dados experimentais obtidos em 2018. Após isso, foi verificado a acurácia dos modelos de estimativa da PG e PB em função dos dois índices de vegetação para cada estágio fenológico.

A qualidade de ajuste do modelo para as fases de calibração e validação foi avaliada pelo coeficiente de determinação ajustado (R^2) (Cornell e Berger, 1987), Raiz do erro quadrático médio (Root Mean Squared Error - RMSE) (Equação 3) e Erro Médio (Mean Bias Error - MBE) (Equação 4) (Ghilani e Wolf, 2006). Os outliers foram removidos conforme metodologia proposta por Belsley et al. (1980), até o limite de 15% dos dados originais. A análise de variância dos modelos foi realizada pelo teste F (1% de probabilidade).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{Yobs}_i - \text{Yest}_i)^2}{N}} \quad (3)$$

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Yobs}_i - \text{Yest}_i)}{N} \quad (4)$$

Em que:

N = número de dados;

Xobs_i = valores observados de X;

Yobs_i = valores observados de Y;

Yest_i = valores estimados de Y;

3.3 Resultados e discussão

A produtividade de biomassa (PB) e de grãos (PG) da aveia-branca em função dos níveis de irrigação foi inferior no ano agrícola de 2018 em relação ao ano agrícola de 2017, independentemente do tratamento (Figura 3). Entretanto, observa-se que para a PB a diferença entre os anos foi menos pronunciada do que para a PG. Isso pode ser explicado pelas maiores temperaturas do ano de 2018 em comparação a 2017 (Figura 2A e 2C), afetando o desempenho agrônômico da aveia-branca, especialmente na duração do florescimento da cultura e tempo de enchimento de grãos (Tabela 2). Observa-se que para cada período acumulado de 15 dias, o ano de 2018 só não apresentou maiores temperaturas no período entre 16-30 dias após o plantio (DAP) da aveia. Nos demais períodos o ano de 2018 apresentou temperaturas maiores do que em 2017, com diferença de até 3,5 °C na temperatura média (45-60 DAP). Além disso, o ciclo da cultura em 2018 (95 dias) foi inferior à 2017 (105 dias) em 10 dias, interferindo diretamente no enchimento de grãos da cultura.

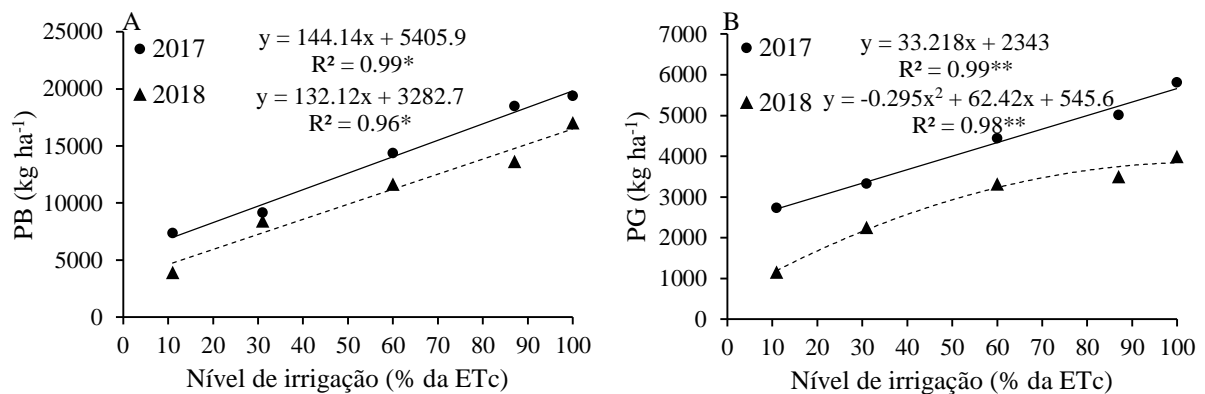


Figura 3. Produtividade de biomassa (PB) (A) e de grãos (PG) (B) da aveia-branca em função dos tratamentos de aplicação de níveis de irrigação nos dois anos agrícolas

De acordo com Ugarte et al. (2007), temperaturas elevadas antes da antese de cereais de inverno são deletérias aos cultivos, sendo o limite máximo de temperatura ideal para esse período de 28 °C. Para o ano de 2018, a temperatura máxima média foi de 28,2°C, enquanto que para 2017 de 26,8 °C, justificando o menor desempenho agrônômico e PG da cultura para esse ano.

Tabela 2. Temperaturas máximas e mínimas média e temperatura média para cada período de 15 dias nos anos experimentais de 2017 e 2018.

DAP	-----2017-----			-----2018-----		
	T Med	T Máx	T Mín	T Med	T Máx	T Mín
0-15	21.0 ±0.22	27.0 ±0.46	16.5 ±0.44	22.8 ±0.24	29.9 ±0.40	16.7 ±0.29
16-30	21.2 ±0.49	28.1 ±0.66	15.6 ±0.47	18.9 ±0.64	26.9 ±0.72	12.2 ±0.85
31-45	18.5 ±0.54	25.6 ±0.70	12.9 ±0.62	21.1 ±0.44	28.0 ±0.53	15.6 ±0.53
45-60	17.6 ±0.49	24.9 ±0.43	11.6 ±0.47	21.1 ±0.33	28.7 ±0.44	14.5 ±0.40
61-75	18.3 ±0.50	26.1 ±0.68	11.6 ±0.33	20.0 ±0.73	28.1 ±0.82	12.4 ±0.67
76-90	18.4 ±0.26	26.4 ±0.34	11.4 ±0.24	21.7 ±0.25	29.8 ±0.29	14.2 ±0.23

Valores variando após a temperatura correspondem ao erro padrão da média; DAP – dias após o plantio; T – temperatura em °C; Med – média; Máx – máxima; Mín – mínima;

A PG no ano agrícola de 2018 obteve seu valor máximo (3.853 kg ha⁻¹) no nível de irrigação de 106% da ETc (Figura 3B). No ano agrícola de 2017 não foi possível definir a PG máxima da aveia-branca, ou seja, em anos agrícolas mais desfavoráveis ao cultivo da aveia-branca, com maiores temperaturas, o nível de irrigação adotado pode ser inferior à anos favoráveis de cultivo para a obtenção de máximas

produtividades. Entretanto, ainda assim o nível de irrigação que garantiu a máxima PG em 2018 foi superior a 100% da ET_c, indicando que a aveia-branca apresenta respostas positivas no aumento da PG em níveis de irrigação em excesso.

Os máximos valores dos índices de vegetação NDVI e IRVI para o primeiro ano (2017) de avaliação foram obtidos nos níveis de irrigação de 102% da ET_c e 93% da ET_c, respectivamente (Figura 4A e 4B). Para o segundo ano (2018) de avaliação, os máximos valores dos índices NDVI e IRVI foram obtidos nos níveis de irrigação de 96% da ET_c e 88% da ET_c, respectivamente (Figura 4C e 4D). Sendo assim, verifica-se que níveis deficitários de irrigação podem gerar distúrbios fisiológicos na aveia-branca, uma vez que os pontos de máximo e mínimo para o NDVI e IRVI ficaram próximos do nível de irrigação de 100% da ET_c, sendo índices que apontam com acurácia o estado fisiológico das plantas (Ihuoma e Madramootoo, 2017). Como o IRVI é a razão entre a reflectância do vermelho com o a reflectância do infravermelho, os valores de avaliação decrescem com o aumento da PB das culturas, pois quanto maior a PB, menor a reflectância na banda do vermelho (650 nm) e maior na banda do infravermelho (770 nm).

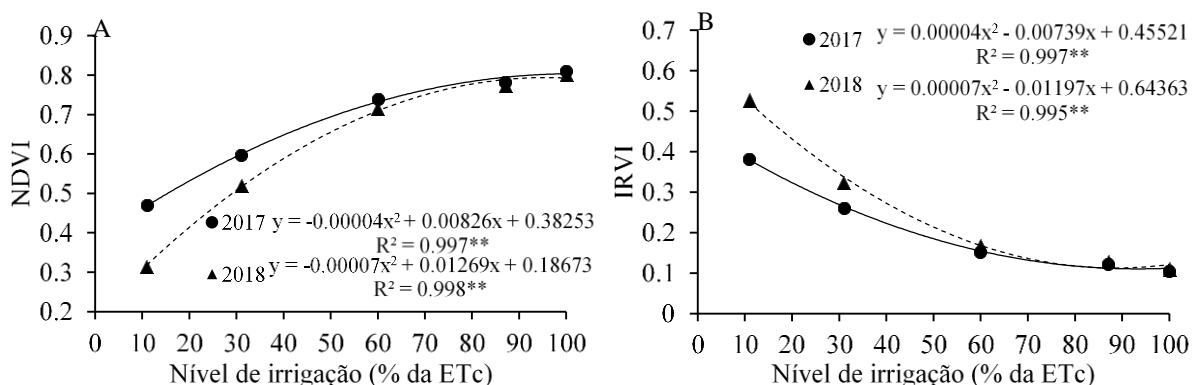


Figura 4. Variação dos valores de NDVI (A) e IRVI (B) em função dos níveis de irrigação para os dois anos agrícolas. Valores médios por tratamento para a avaliação no estágio 10.5.4 (grão aquoso). **Significativo a 1% de probabilidade

Observa-se que em ambos os anos o mínimo valor de IRVI foi obtido em nível de irrigação inferior ao do NDVI. Ainda, observa-se que para o segundo ano os valores máximos dos níveis de irrigação foram inferiores ao do primeiro ano. Como o segundo ano apresentou condições climáticas mais adversas para a obtenção de elevados rendimentos da aveia-branca, conforme discutido anteriormente, nota-se que o nível

de irrigação para essas condições pode ser inferior a anos favoráveis de cultivo, podendo reduzir a quantidade de água aplicada na cultura.

Avaliando-se as equações geradas, nota-se que as menores leituras dos índices NDVI e IRVI entre os anos foi devido a variação interanual dos valores. Observa-se que os coeficientes angulares e lineares das equações geradas ficaram próximos entre si nos dois anos, confirmando que a variação das leituras desses índices em função do nível de irrigação é proporcional, independente do ano. Entretanto, observando a constante da equação, percebe-se que a variação significativa das leituras entre os anos foi devido às elevadas variações entre os anos, uma vez que no ano de 2017 a constante da equação foi de 0,382 e em 2018 de 0,187, variação de mais de 100%.

À exceção da primeira análise de NDVI e IRVI, no estágio 4, todas as regressões para a estimativa da PG na fase de calibração foram significativas estatisticamente ($p < 0,01$) (Figuras 5 e 6). Os melhores ajustes em função do NDVI e IRVI foram obtidas nas duas últimas análises, nos estádios 10 e 10.5.4, observando-se coeficientes de determinação de 0.90 e 0.91 para o NDVI e 0.83 e 0.87 para o IRVI, respectivamente.

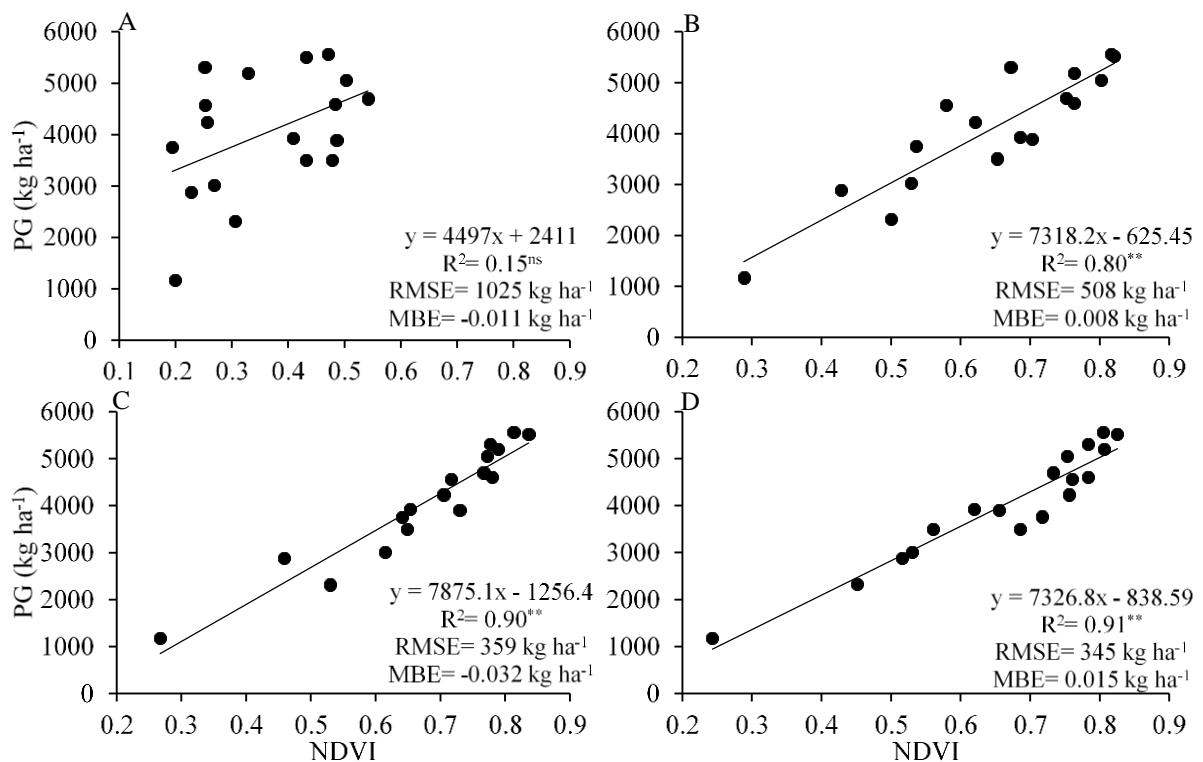


Figura 5. Desempenho dos modelos de estimativa da produtividade de grãos (PG) da aveia-branca em função do índice de vegetação NDVI, na fase de calibração, para os estádios fenológicos 4 (A), 8 (B), 10 (C) e 10.5.4 (D) de acordo com a escala fenológica de Feeks e Large (Large 1954). *Significativo a 5%; ** Significativo a 1%; ^{ns} não significativo.

A pequena acurácia obtida pelo modelo de estimativa da PG em função do NDVI e o IRVI para a primeira avaliação pode ser explicada em função da adubação e do estágio fenológico da cultura. A dose de N em cobertura foi parcelada em duas vezes e, para essa avaliação, somente a primeira parcela (60% do total) havia sido aplicado nos tratamentos. Além disso, como a aveia estava no início do seu desenvolvimento, a demanda por nutrientes e água é baixa, sendo suprida com a quantidade de fertilizantes aplicada na semeadura e na primeira cobertura e pela quantidade de água fornecida pelas chuvas que ocorreram no início do desenvolvimento da cultura em 2017 (Figura 2A), não se verificando diferenças relevantes entre os tratamentos que pudesse gerar elevada variabilidade para a significância da modelagem.

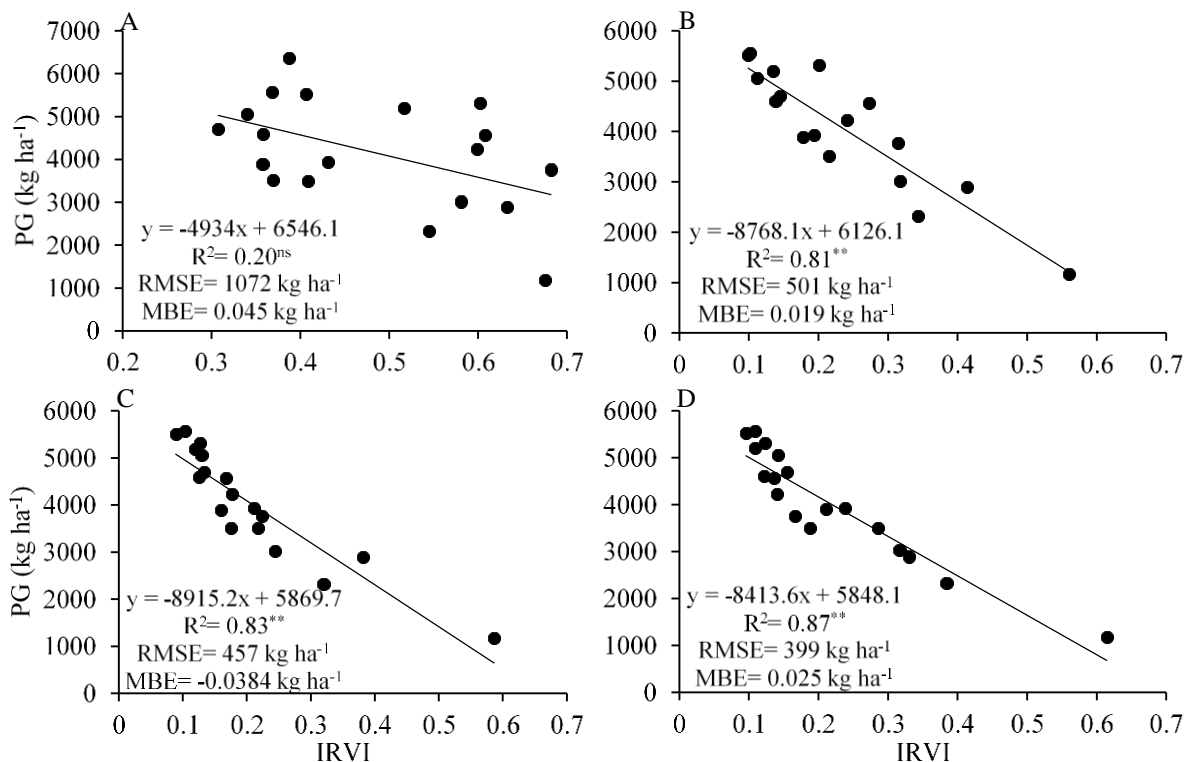


Figura 6. Desempenho dos modelos de estimativa da produtividade de grãos (PG) da aveia-branca em função do índice de vegetação IRVI, na fase de calibração, para os estádios fenológicos 4 (A), 8 (B), 10 (C) e 10.5.4 (D) de acordo com

a escala fenológica de Feeks e Large (Large 1954). *Significativo a 5%; ** Significativo a 1%; ^{ns} não significativo.

Pelos modelos calibrados gerados em função do NDVI e IRVI para a estimativa da PG da aveia, observa-se para a média dos três últimos estádios de avaliação que a PG da cultura aumenta em 750 kg ha⁻¹ e 870 kg ha⁻¹, com o aumento e decréscimo em 0,1 dos valores de NDVI e IRVI, respectivamente.

O índice de vegetação NDVI apresentou maior acurácia na estimativa da PG do que o IRVI. A precisão (R^2) do NDVI foi superior nas duas últimas análises e o erro (RMSE) foi inferior ao obtido pelo IRVI. Apesar disso, observa-se que o erro e a precisão do modelo gerado em função do NDVI estabilizaram-se a partir da avaliação no estádio 10, enquanto que para o IRVI ocorreu tendência de aumento da precisão e queda no erro comparando as avaliações. Isso pode ter ocorrido devido à saturação das leituras de NDVI gerada pela grande cobertura do solo em fases adiantadas do ciclo da cultura (Povh et al., 2008), o que pode ser corrigido utilizando ajustes na avaliação como a utilização de leituras em diferentes faixas do infravermelho (Gu et al., 2013).

Assim como no presente estudo, Wang et al. (2014) observaram que a maior correlação com a PG do trigo foi obtida com o índice de vegetação NDVI e na fase de início do enchimento de grãos (10.5.4). Isso ocorre, pois os índices de vegetação são sensíveis ao índice de área foliar e teor de clorofila das folhas (Zarco-Tejada, et al. 2013). Logo, plantas com maior concentração de clorofila nas folhas e área foliar apresentam correlação direta com a produtividade final (Pramanik e Bera, 2013), aumentando a taxa de fotossíntese e fotoassimilados para o enchimento dos grãos (Zhang et al., 2013).

Embora os índices de vegetação tenham sido muito utilizados para estudos com doses de N, a sua utilização em experimentos com níveis de irrigação também proporcionam bons resultados. Nesse estudo, por exemplo, ocorreram diferença das leituras entre os tratamentos, pois, de acordo com Zhang et al. (2011), o estresse hídrico diminui o conteúdo de clorofila nas folhas e o índice de área foliar, afetando as leituras de NDVI. Isso ocorre, pois tratamentos com baixo nível de aplicação de água limita o crescimento das plantas devido à falta de umidade do solo, aumenta as perdas de N por volatilização, diminuindo o crescimento das plantas (Viero et al., 2017). Além

disso, a água é o meio de transporte de nutrientes para as plantas, em que a sua falta no solo leva às plantas ao estresse nutricional (Lisar et al., 2012).

Na Figura 7 observa-se o desempenho de estimativa da PG para a validação dos modelos gerados para cada estágio fenológico da aveia-branca com os índices de vegetação NDVI e IRVI. Verificou-se que os modelos gerados em estádios mais avançados no ciclo (10.5.4) apresentaram menor erro do que os gerados em estádios mais iniciais (8 e 10). Independentemente do estágio, todos modelos apresentaram superestimativa da PG.

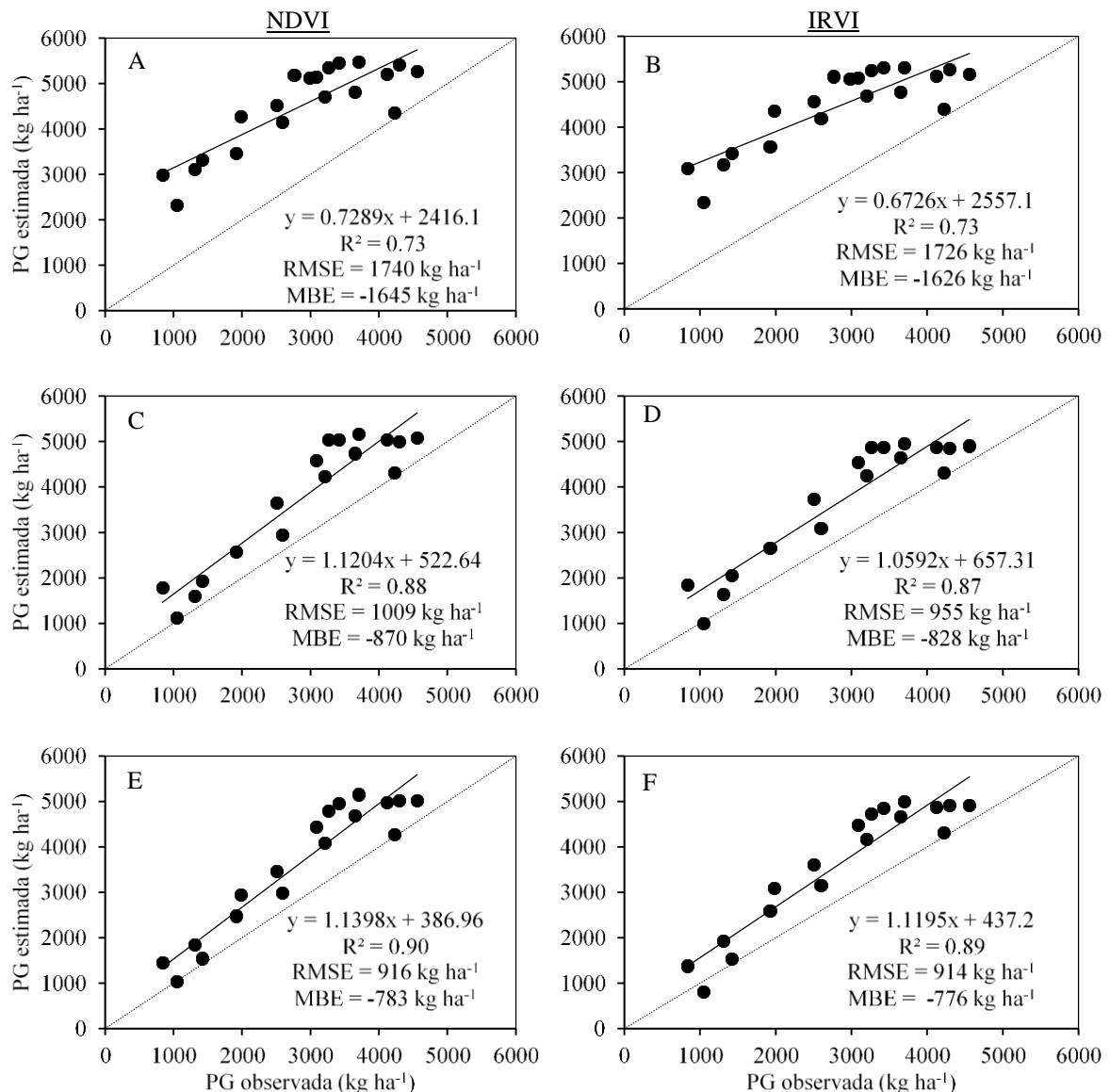


Figura 7. Gráfico de desempenho para a validação dos modelos gerados na estimativa da produtividade de grãos (PG) da aveia-branca em função dos valores de NDVI e IRVI nos estádios 8 (A e B), 10 (C e D) e 10.5.4 (E e F).

O menor erro foi obtido para o modelo do estágio 10.5.4, com erro médio de estimativa (MBE) de 783 kg ha⁻¹ e 776 kg ha⁻¹ para os índices NDVI e IRVI, respectivamente. Considerando a produtividade média de grãos dos dados de validação (2,839 kg ha⁻¹), o modelo com o NDVI e IRVI superestimaram em 27% a produtividade da aveia-branca, não verificando diferenças expressiva entre a precisão (R²) e os erros médios (RMSE e MBE) dos modelos em função dos índices.

Todas as regressões foram significativas estatisticamente ($p < 0,01$) para a estimativa da PB da aveia-branca utilizando os índices NDVI e IRVI, à exceção da primeira análise (Figuras 8 e 9). A maior acurácia para os modelos foram observados para a análise no estágio 10.5.4. As regressões que foram significativas apresentaram-se mais acuradas quando utilizou-se o NDVI, em todas as avaliações, apresentando-se mais precisas (R²) e com menor erro (RMSE). A tendência (MBE) foi praticamente nula em todas as avaliações e para os dois índices estudados.

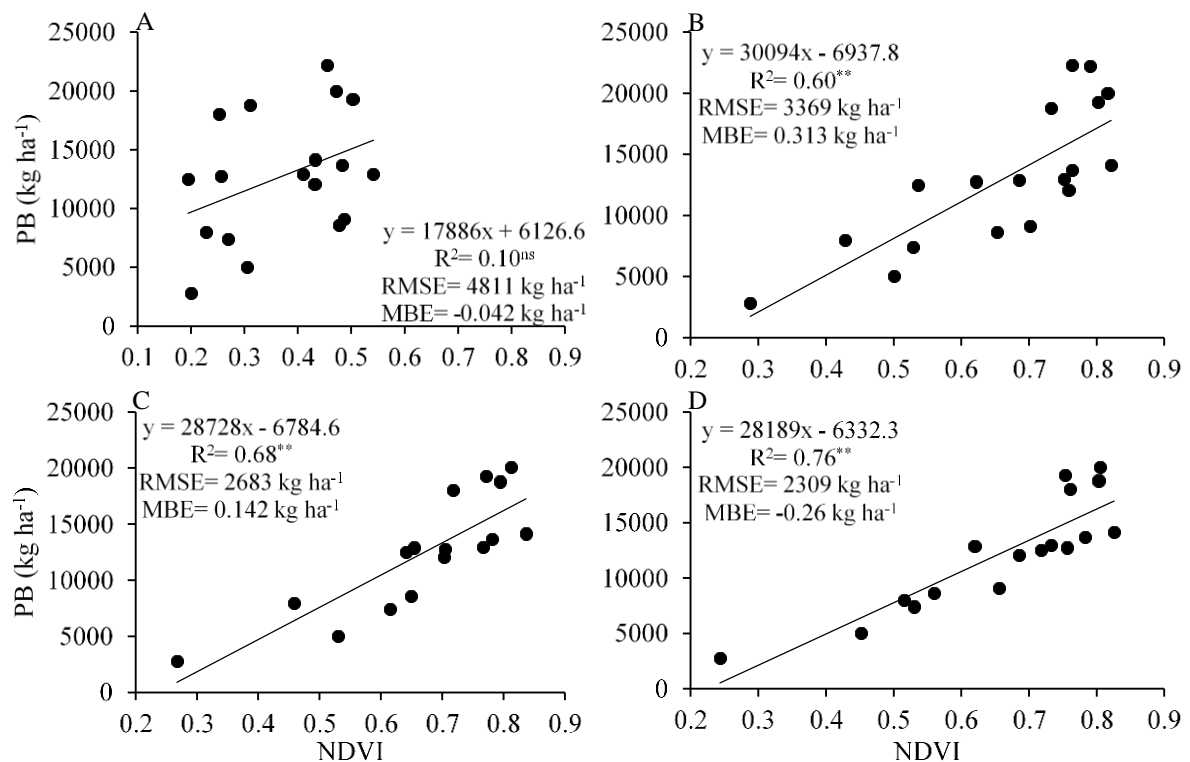


Figura 8. Desempenho dos modelos de estimativa da produtividade de biomassa (PB) da aveia-branca em função do índice de vegetação NDVI, na fase de calibração, para os estádios fenológicos 4 (A), 8 (B), 10 (C) e 10.5.4 (D) de acordo com a escala fenológica de Feeks e Large (Large 1954). *Significativo a 5%; ** Significativo a 1%; ^{ns} não significativo.

Verifica-se que a estimativa da PB não apresenta a mesma precisão do que a estimativa da PG. Para o amendoim, Zerbato et al. (2016) observaram R^2 de 0,27 na estimativa da PB da cultura, enquanto que para o arroz e a cevada o maior R^2 observado foi de 0,51 e 0,76, respectivamente, apresentando baixa precisão de estimativa (Gnyp et al., 2014, Tilly et al., 2015). A explicação para isso pode estar no fato da grande variabilidade espacial de tal atributo, sendo influenciado por diversos fatores, tais como espaçamento, altura de plantas, sombreamento e potencial genético. Em culturas de inverno, em que as cultivares são comercializadas como linhagens, essa variabilidade é ainda maior, fato não tão pronunciado como o apresentado em híbridos (Gnyp et al., 2014).

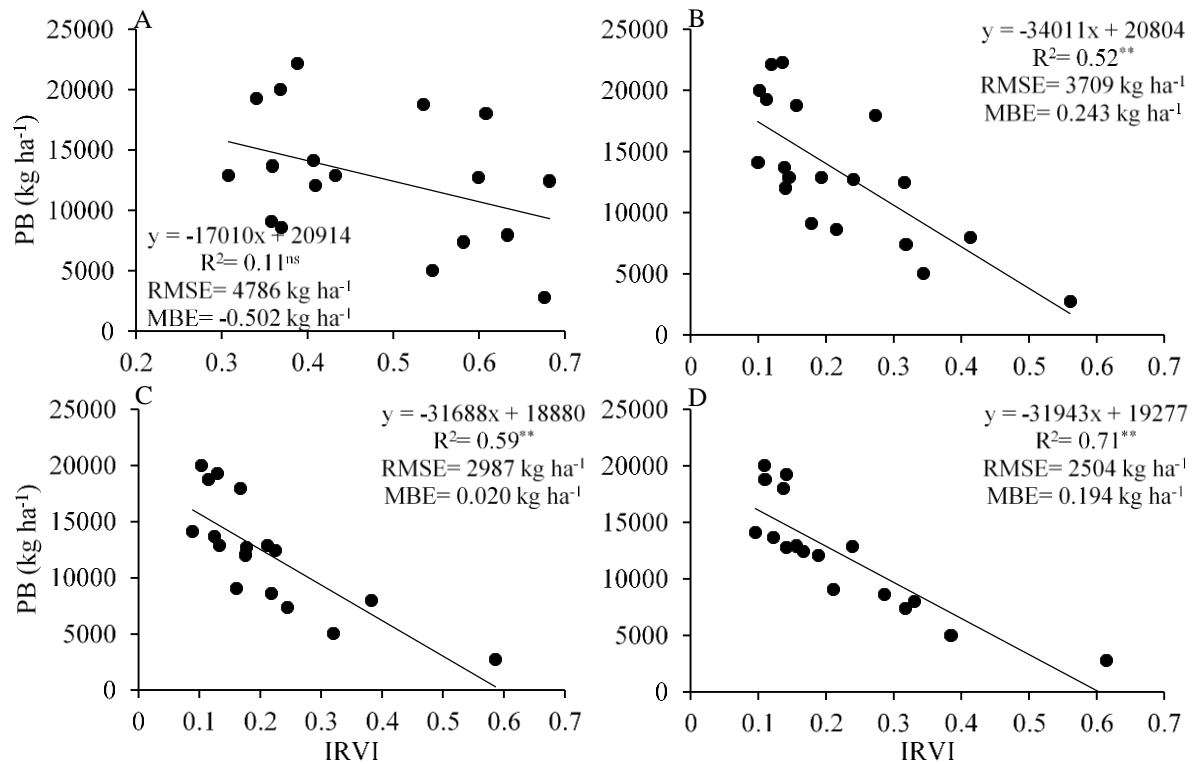


Figura 9. Desempenho dos modelos de estimativa da produtividade de biomassa (PB) da aveia-branca em função do índice de vegetação IRVI, na fase de calibração, para os estádios fenológicos 4 (A), 8 (B), 10 (C) e 10.5.4 (D) de acordo com a escala fenológica de Feeks e Large (Large 1954). *Significativo a 5%; ** Significativo a 1%; ^{ns} não significativo.

Avaliando dois equipamentos e os índices NDVI e IRVI na estimativa da PB e teor de N na folha de trigo, Kapp Júnior et al. (2016) não observaram diferenças entre equipamentos e índices, uma vez que apresentaram coeficiente de correlação semelhantes. Para a estimativa de área foliar, observa-se que o IRVI apresenta-se

com maior precisão do que o NDVI (Kulig et al., 2014). Esse fato pode estar associado à saturação dos valores de NDVI em vegetação densa, como explicado anteriormente (Povh et al., 2008).

Na Figura 10 é apresentado o desempenho de estimativa da PB para a validação dos modelos gerados para cada estágio fenológico da aveia-branca com os índices de vegetação NDVI e IRVI. Observa-se que os modelos gerados em estádios mais avançados no ciclo (10.5.4) apresentaram menor erro do que os gerados em estádios mais iniciais (8 e 10).

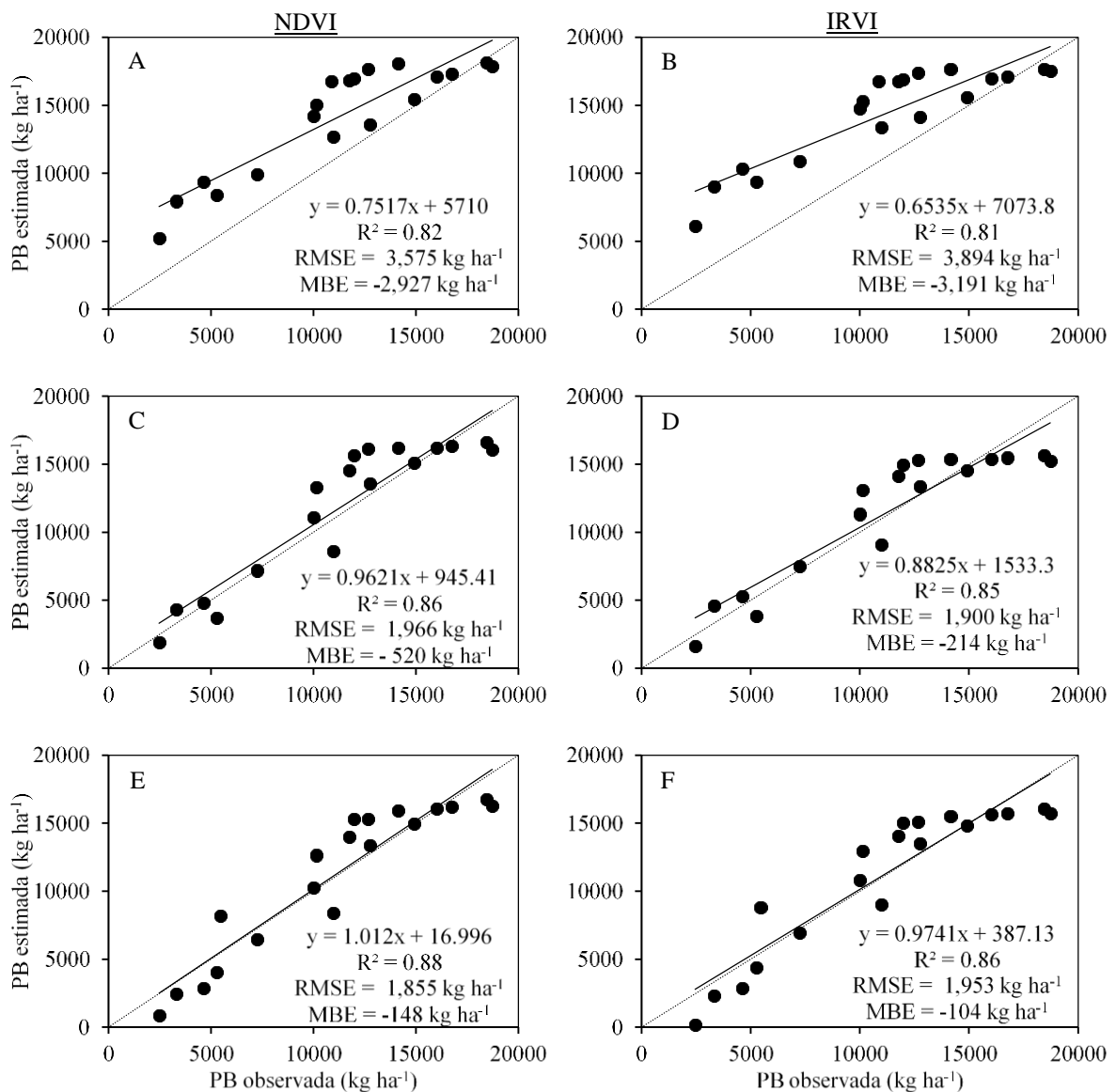


Figura 10. Gráfico de desempenho para a validação dos modelos gerados na estimativa da produtividade de biomassa (PB) da aveia-branca em função dos valores de NDVI e IRVI nos estádios 8 (A e B), 10 (C e D) e 10.5.4 (E e F).

Independentemente do estágio, todos modelos apresentaram superestimativa da PB. Entretanto, a maior superestimativa ocorreu para os modelos do estágio fenológico 8, com MBE maior de 3.500 kg ha^{-1} , enquanto para os demais estádios o erro médio dos modelos foram muito inferiores. O menor erro foi obtido para o modelo do estágio 10.5.4, com erro médio de estimativa (MBE) de 148 kg ha^{-1} e 104 kg ha^{-1} para os índices NDVI e IRVI, respectivamente. Considerando a produtividade média de biomassa dos dados de validação ($10.919 \text{ kg ha}^{-1}$), o modelo com o NDVI e IRVI superestimaram em 1,36% e 0,90% a PB da aveia-branca. Para a PB, o erro médio de estimativa dos modelos gerados para o IRVI foram menores nos estádios 10 e 10.5.4 do que os apresentados em função do NDVI, enquanto a precisão (R^2) não apresentou diferenças relevantes.

Embora tenham sido realizados os mesmos manejos da safra anterior (2017), e as leituras obtidas nos mesmos estádios fenológicos, notou-se que ocorreram superestimativas consideráveis na PG da aveia-branca. Isso ocorre devido aos índices de vegetação apresentarem variabilidades interanuais (Grohs et al., 2011). Dessa forma, nem sempre os mesmos valores obtidos entre os anos levam às mesmas PG. Fatores bióticos e abióticos como temperatura, umidade relativa, radiação solar e incidência de doenças nos estádios posteriores às leituras podem afetar o desenvolvimento da cultura e a sua produtividade, gerando rendimento diferentes para os mesmos valores de índices de vegetação (Rissini et al., 2015).

Considerando que mais de 60% da variabilidade interanual da produtividade das culturas pode ser explicada pela variabilidade climática (Ray et al., 2015), verifica-se que o erro dos modelos em superestimar o rendimento da aveia em 27% é considerado aceitável. Objetivando avaliar a variabilidade espacial da PG do trigo com valores de NDVI para a validação de modelos, Grohs et al. (2011) observaram média correspondência (48%) entre os valores observados e preditos. Segundo os autores, a predição da PG em função de somente valores de NDVI é instável ao longo do ciclo das culturas. Para a PB, os mesmos autores observaram correspondência de 81%, valor muito acima do observado para a PG, sendo esse fato semelhante ao observado no presente estudo. Verifica-se no presente estudo que a estimativa da PB em função do NDVI é mais acurada do que para a estimativa da PG, devido a esse último ser altamente influenciado pelas condições climáticas (Raun et al., 2005).

Em grande parte dos trabalhos de calibração e validação de modelos, o conjunto de dados provém de um mesmo ano agrícola, em que parte das amostras é destinada para a calibração dos modelos e outra parte para a validação (Zelege et al., 2011; Gomes et al., 2014). Esse método de validação garante maior acurácia aos modelos, pois como todas as amostras foram submetidas às mesmas condições ambientais, logo não existe a variabilidade interanual dos índices que poderia reduzir a precisão e aumentar o erro dos modelos. Em trabalhos que a validação ocorre com dados provenientes de outros locais de estudo e/ou outros anos agrícolas, variações de estimativa de 10% a 30% são observadas pelos modelos calibrados, mas ainda sim são recomendados pelos autores para a estimativa do crescimento e rendimento das culturas (Camargo et al., 1999; Nassif et al., 2012; Bertolin et al., 2017).

3.4 Conclusões

Independentemente do índice de vegetação utilizado, os modelos apresentaram boa capacidade de generalização, com maior acurácia para a estimativa da PB da aveia-branca. Modelos calibrados em função do índice de vegetação IRVI e em estádios fenológicos próximos ao florescimento da cultura apresentaram maior acurácia de estimativa.

3.5 Referências

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration - **Guidelines for computing crop water requirements** Rome: FAO. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 56).

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G (2013) Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22:711-728.

Belsley DA, Kuh E, Welsch RE (1980) **Identifying Influential Data and Sources of Collinearity**. Regression Diagnostics. New York: John Wiley & Sons. 300p.

Bertolin NO, Filgueiras R, Venancio LP, Mantovani EC (2017) Predição da produtividade de milho irrigado com auxílio de imagens de satélite. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** 11:1627-1628.

Bolton DK, Friedl MA (2013) Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. **Agricultural and Forest Meteorology** 173:74-84.

Bredemeier C, Variani C, Almeida D, Rosa AT (2013) Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural** 43:1147-1154.

Camargo MBP, Ortolani AA, Pedro Júnior MJ, Rosa SM (1999) Modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade para o cultivar de laranja valência. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 58:171-178.

Chen JM (1996) Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. **Canadian Journal of Remote Sensing** 22:229-242.

Cornell JA, Berger RD (1987) Factors that influence the value of the coefficient of determination in simple linear and nonlinear regression models. **Phytopathology** 77:63-70.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Brasília, 353 p.

Escosteguy PAV, Fontoura SMV, Carvalho IQ (2014) Fertilidade do solo, calagem e adubação. In.: Lângaro NC, Carvalho IQ (Eds.) **Indicações técnicas para a cultura da aveia: XXXIV Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisas de Aveia Fundação ABC**. p.24-43.

Ghilani CD, Wolf PR (2006) **Adjustment computations: Spatial data analysis**. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 4 ed., 611 p.

Gnyp ML, Miao Y, Yuan F, Ustin SL, Yu K, Yao Y, Huang S, Bareth G (2014) Hyperspectral canopy sensing of paddy rice aboveground biomass at different growth stages. **Field Crops Research** 155:42-55.

Grohs DS, Bredemeier C, Mundstock CM, Poletto N (2009) Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola** 29:101-112.

Grohs DS, Bredemeier C, Poletto N, Mundstock CM (2011) Validação de modelo para predição do potencial produtivo de trigo com sensor óptico ativo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 46:446-449.

Gomes ACS, Robaina AD, Peiter MX, Soares FC, Parizi ARC (2014) Modelo para estimativa da produtividade para a cultura da soja. **Ciência Rural** 44:43-49.

Gu Y, Wylie BK, Howard DM, Phuyal KP, Ji L (2013) NDVI saturation adjustment: A new approach for improving cropland performance estimates in the Greater Platte River Basin, USA. **Ecological indicators** 30:1-6.

Ihuoma SO, Madramootoo CA (2017) Recent advances in crop water stress detection. **Computers and Electronics in Agriculture** 141:267-275.

Jat H, Kaushik MK, Nepalia V, Singh D (2017) Effect of irrigation schedule and nitrogen fertilization on growth, yield and quality of fodder oat (*Avena sativa* L.). **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry** 6:2040-2042.

Kamble B, Kilic A, Hubbard K (2013) Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. **Remote Sensing** 5:1588-1602.

Kapp Junior C, Guimarães AM, Caires EF (2016) Use of active canopy sensors to discriminate wheat response to nitrogen fertilization under no-tillage. **Engenharia Agrícola** 36:886-894.

Kulig B, Giab T, Oleksy A, Klimek-Kopyra A, Kołodziejczyk M, Zając T (2014) Effect of the method of plant protection on the yield, root development and formation of vegetation indices of faba bean canopy. **Bulgarian Journal of Agricultural Science** 20:381-390.

Large EC (1954) Growth stages in cereals illustration of the Feekes scale. **Plant pathology** 3:128-129.

Lauer DA (1983) Line-Source Sprinkler Systems for Experimentation with Sprinkler-Applied Nitrogen Fertilizers 1. **Soil Science Society of America Journal** 47:124-128.

Li F, Miao Y, Hennig SD, Gnyp ML, Chen X, Jia L, Bareth G (2010) Evaluating hyperspectral vegetation indices for estimating nitrogen concentration of winter wheat at different growth stages. **Precision Agriculture** 11:335-357.

Lisar SY, Motafakkerzad R, Hossain MM, Rahman IM (2012) **Water stress in plants: causes, effects and responses**. In Water stress. InTech 300p.

Nassif DSP, Marin FR, Pallone Filho WJ, Resende RS, Pellegrino GQ (2012) Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 47:311-318.

Panasiewicz K, Koziara W, Faligowska A (2017) Response of three oat forms to sprinkling irrigation and nitrogen fertilization. **Turkish Journal of Field Crops** 22:81-88.

Pantazi XE, Moschou D, Bravo C (2016) Active learning system for weed species recognition based on hyperspectral sensing. **Biosystems Engineering** 146:193-202.

Povh FP, Molin JP, Gimenez LM, Pauletti V, Molin R, Salvi JV (2008) Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 43:1075-1083.

Pramanik K, Bera AK (2013) Effect of seedling age and nitrogen fertilizer on growth, chlorophyll content, yield and economics of hybrid rice (*Oryza sativa* L.). **International Journal of Agronomy and Plant Production** 4:3489-3499.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (2001) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. 1 ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas.

Raun WR, Solie JB, Stone ML, Martin KL, Freeman KW, Mullen RW et al. (2005) Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 36:2759-2781.

Ray DK, Gerber JS, Macdonald GK, West PC (2015) Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature Communications** 6.

Richardson AJ, Wiegand CL (1977) Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 43:1541-1552.

Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW (1974) **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. Third ERTS-1 Symposium (pp. 309–317). Washington, DC: NASA.

Rissini AL, Kawakami J, Genú AM (2015) Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:1703-1715.

Santos GO, Rosalen DL, Faria RT (2017b) Use of active optical sensor in the characteristics analysis of the fertigated brachiaria with treated sewage. **Engenharia Agrícola** 37:1213-1221.

Tilly N, Aasen H, Bareth G (2015) Fusion of plant height and vegetation indices for the estimation of barley biomass. **Remote Sensing** 7:11449-11480.

Ugarte C, Calderini DF, Slafe GA (2007) Grain weight and grain number responsiveness to pre-anthesis temperature in wheat, barley and triticale. **Field Crops Research** 100:240-248.

Viero F, Menegati GB, Carniel E, Silva PRFD, Bayer C (2017) Urease Inhibitor and Irrigation Management to Mitigate Ammonia Volatilization from Urea in No-Till Corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 41.

Wang L, Tian Y, Yao X, Zhu Y, Cao W (2014) Predicting grain yield and protein content in wheat by fusing multi-sensor and multi-temporal remote-sensing images. **Field Crops Research** 164:178-188.

Yao Y, Miao Y, Huang S, Gao L, Ma X, Zhao G et al. (2012) Active canopy sensor-based precision N management strategy for rice. **Agronomy for sustainable development** 32:925-933.

Zarco-Tejada PJ, González-Dugo V, Williams LE, Suárez L, Berni JÁ, Goldhamer D, Fereres E (2013). A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. **Remote sensing of environment** 138:38-50.

Zerbato C, Rosalen DL, Furlani CEA, Deghaid J, Voltarelli MA (2016) Agronomic characteristics associated with the normalized difference vegetation index (NDVI) in the peanut crop. **Australian Journal of Crop Science** 10:758-764.

Zelege KT, Luckett D, Cowley R (2011) Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. **Agronomy Journal** 103:1610-1618.

Zhang YJ, Xie ZK, Wang YJ, Su PX, An LP, Gao H (2011) Effect of water stress on leaf photosynthesis, chlorophyll content, and growth of oriental lily. **Russian Journal of Plant Physiology** 58:844-850.

Zhang X, Huang G, Bian X, Zhao Q (2013) Effects of root interaction and nitrogen fertilization on the chlorophyll content, root activity, photosynthetic characteristics of intercropped soybean and microbial quantity in the rhizosphere. **Plant Soil Environment** 59:80-88.

Zhao B, Duan A, Ata-UI-Karim ST, Liu Z, Chen Z, Gong Z et al. (2018) Exploring new spectral bands and vegetation indices for estimating nitrogen nutrition index of summer maize. **European Journal of Agronomy** 93:113-125.

CAPÍTULO 4 – Considerações finais

A partir do presente estudo foi possível a obtenção de importantes recomendações técnicas para a cultura da aveia-branca. A definição da quantidade ideal de efluente de esgoto (EETE) a ser aplicado na cultura, por exemplo, pode ser dada em função das doses de nitrogênio fornecidas pelo resíduo. No geral, recomenda-se doses de N via EETE de 80 a 90 kg ha⁻¹ para a cultura, com as quantidades de N via EETE sendo fornecidas em função da demanda hídrica da cultura, fato que diminui perdas do N por lixiviação. Além disso, foram definidos limites críticos do índice de vegetação NDVI, em que a partir disso, pode-se fazer a aplicação do resíduo em taxa variável nas lavouras.

Em relação ao manejo da irrigação na aveia-branca, observou-se que a produtividade da cultura foi crescente em função do nível de irrigação utilizado, não recomendando-se do ponto de vista técnico a irrigação deficitária nessa cultura. Além disso, pode-se recomendar que em anos mais quentes, com maiores temperaturas médias, a quantidade de água a ser aplicada na cultura pode ser menor do que em anos favoráveis ao cultivo para a obtenção de máximas produtividades. Outro ponto importante é que a estimativa da produtividade de grãos e de biomassa da cultura em função de índices de vegetação apresentou elevada acurácia, principalmente para a estimativa da produtividade de biomassa em função do índice IRVI e com modelos calibrados em estágio fenológicos mais próximos ao florescimento da aveia.

No geral, verificou-se que para as condições em que a cultura foi submetida no presente estudo, principalmente sendo cultivada em solo de elevada fertilidade (Latosolo Vermelho eutrófico) e em região que apresenta inverno seco, a irrigação apresentou-se mais importante na obtenção de elevados rendimentos para a cultura do que o manejo da adubação nitrogenada via EETE. No estudo com EETE, em que a cultura foi submetida a lâmina constante de irrigação e variação gradual de EETE, a produtividade de grãos da cultura com a dose de N em cobertura de apenas 10 kg ha⁻¹ foi de 4.000 kg ha⁻¹, enquanto que no estudo com níveis de irrigação, onde todos os tratamentos receberam 100 kg ha⁻¹ de N, a produtividade de grãos da cultura com o nível de irrigação de 11% da evapotranspiração foi inferior a 2.500 kg ha⁻¹ nos dois anos do estudo, valor quase 50% inferior.