

SENESCÊNCIA FOLIAR E RESPOSTA DE HÍBRIDOS DE MILHO LIBERADOS COMERCIALMENTE PARA CULTIVO EM DIFERENTES ÉPOCAS AO ADENSAMENTO

LUÍS SANGOI¹, CLAITSON GUSTAVO ZANIN¹,
AMAURI SCHMITT¹ e JEFFERSON VIEIRA¹

¹Udesc, Lages, SC, Brasil, a2ls@cav.udesc.br; claitsonzanin@gmail.com, amauri.schmitt@agronomo.eng.br; a6jvi@cav.udesc.br

Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.12, n.1, p. 21-32, 2013

RESUMO - Este trabalho foi conduzido objetivando avaliar os efeitos do adensamento sobre a senescência foliar no enchimento de grãos e a produtividade de híbridos de milho liberados comercialmente para cultivo em diferentes épocas. O experimento foi conduzido em Lages, SC, Brasil, nos anos agrícolas de 2008/2009 e 2009/2010. Dois híbridos foram avaliados: AG 303 (híbrido antigo - HA) e P30F53 (híbrido contemporâneo - HC). Cada híbrido foi testado em cinco densidades: 25.000, 50.000, 75.000, 100.000 e 125.000 pl ha⁻¹. Avaliaram-se a sincronia floral, a área foliar verde e senescida no espigamento, 56 dias após, o rendimento de grãos e seus componentes. A área foliar do HA no espigamento superou a do HC pelo menos 1.000 cm² em todas as densidades. Esta característica se inverteu 56 dias após, quando a área foliar do HC foi maior do que a do HA. As densidades que maximizaram a produtividade do HA e do HC foram de 53.044 e 86.665 pl ha⁻¹, respectivamente. O HC apresentou melhor sincronia entre antese e espigamento e menor esterilidade feminina do que o HA. Estas características contribuíram para que a taxa de incremento da senescência foliar com o aumento na densidade de plantas fosse 2,8 vezes menor no HC do que no HA 56 dias após o espigamento, aumentando a tolerância do HC ao adensamento.

Palavras-chave: *Zea mays*; área foliar; densidade de plantas; produtividade.

LEAF SENESCENCE AND RESPONSE OF MAIZE HYBRIDS COMMERCIALLY RELEASED IN DIFFERENT TIMES TO CROWDING

ABSTRACT - This work was carried out aiming to evaluate the crowding effects on leaf senescence during grain filling and productivity of maize hybrids commercially released in different eras. The trial was set in Lages, SC, Brazil, during the 2008/2009 and 2009/2010 growing seasons. Two hybrids were evaluated: AG 303 (old hybrid - OH) and P30F53 (modern hybrid - MH). Each hybrid was tested at five plant densities: 25,000, 50,000, 75,000, 100,000 and 125,000 pl ha⁻¹. Floral synchrony, green and senesced leaf area at silking, 56 after silking, grain yield and its components were determined. OH leaf area at silking was more than 1,000 cm² higher than MH leaf area at all plant densities. An opposite behavior was observed 56 days after silking, when MH had greater leaf area than OH. Plant densities that promoted highest grain yields were 53,044 and 86,665 pl ha⁻¹ for OH and MH, respectively. MH presented better synchrony between anthesis and silking and lower female sterility than OH. Such traits contribute to the 2.8 smaller leaf senescence rate of MH with the increment in plant density 56 days after silking, increasing the MH tolerance to crowding.

Key words: *Zea mays*; leaf area; plant density; productivity.

O aumento na densidade de plantas é uma forma de maximizar a interceptação da radiação solar pelo incremento do índice de área foliar. Contudo, ele também pode reduzir a eficiência de conversão dos fotoassimilados à produção de grãos, aumentando a esterilidade feminina, a defasagem entre a antese e o espigamento e reduzindo o número de grãos por espiga (Andrade et al., 2002; Tollenaar et al., 2006).

Os híbridos de milho cultivados atualmente são mais tolerantes ao adensamento do que aqueles utilizados no século passado, como mencionado por Sangoi et al. (2002), Tokatlides & Koutroubas (2004), Tollenaar & Lee (2006), Hammer et al. (2009) e Liu & Tollenaar (2009) em diferentes regiões produtoras no mundo.

O aumento na produção de biomassa da planta durante o enchimento de grãos e a maior eficiência na partição de fotoassimilados à espiga nas fases de pré-florescimento, antese e espigamento foram considerados por Tollenaar & Lee (2002) e Duvick et al. (2004) como importantes características fisiológicas para o incremento no potencial produtivo de híbridos de milho em estandes adensados.

A maior eficiência em converter a fitomassa acumulada na floração em produção de grãos dos híbridos tolerantes ao adensamento pode estar relacionada à senescência foliar mais lenta na fase reprodutiva do milho. A senescência é um processo degenerativo que ocorre ao final do desenvolvimento de qualquer órgão vegetal, incluindo folhas, caules, flores e frutos (Dangl et al., 2000).

A evolução da senescência foliar durante o enchimento de grãos depende da disponibilidade hídrica, do suprimento de nitrogênio e das relações existentes entre fonte e demanda (Borras et al., 2003; Boomsma et al., 2009). Variações na população de

plantas interferem nas relações existentes entre o suprimento de fotoassimilados e a capacidade dos grãos de acomodá-los, afetando, consequentemente, a senescência foliar (Tokatlides & Koutroubas, 2004). A densidade de plantas altera as relações entre fonte e dreno devido aos seus efeitos na área foliar, na quantidade de radiação interceptada e no número de grãos produzidos pela planta (Andrade et al., 2000; Maddoni et al., 2001; Sangoi et al., 2010).

A duração da área foliar depende da disponibilidade de fotoassimilados para sustentar o enchimento de grãos após a floração. A senescência foliar pode ser acelerada tanto pelo excesso, quanto pela falta de carboidratos para atender às demandas da planta. Existe uma faixa ótima de equilíbrio entre fonte e dreno para a manutenção da atividade fotossintética das folhas (Maddoni et al., 2002). Quando a relação está abaixo do limite ideal, a demanda por nitrogênio dos grãos em fase inicial de desenvolvimento impõe à fonte uma deficiência deste nutriente, a qual acelera a senescência devido à remobilização de N das estruturas vegetativas às reprodutivas. Por outro lado, a alta relação entre fonte e demanda aumenta a senescência foliar em resposta ao acúmulo de carboidratos não estruturais nos cloroplastos que inibe a fotossíntese, abreviando a vida útil das folhas (Rajcan & Tollenaar, 1999a).

O retardamento da senescência foliar é uma alternativa para aumentar a quantidade de carbono fixada pelas culturas. A manutenção da atividade fotossintética das folhas durante o enchimento de grãos e a maior tolerância a altas densidades de plantas foram associadas ao incremento no rendimento de grãos do milho registrados na América do Norte durante a segunda metade do século passado por Duvick & Cassmann (1999), Tollenaar & Lee (2002) e Valentinuz & Tollenaar (2004).

Os relatos de estudos analisando a relação existente entre a velocidade de evolução da senescência foliar, o rendimento de grãos e a tolerância ao adensamento de cultivares de milho são escassos no Brasil. Por isto, este trabalho visou quantificar os efeitos do incremento na densidade de plantas sobre a evolução da área foliar verde e senescida durante o enchimento de grãos e a produtividade de híbridos de milho liberados comercialmente para cultivo em diferentes épocas.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido a campo, durante os anos agrícolas de 2008/2009 e 2009/2010, no município de Lages, localizado no Planalto Sul de Santa Catarina. As coordenadas geográficas do local são 27° 50' 35" de latitude Sul e 50° 29' 45" de longitude Oeste e altitude de 849 m. O solo da área experimental é classificado como Nitossolo Vermelho Distrófico típico (Santos et al., 2006). Segundo análise de solo realizada em setembro de 2008, ele apresentava as seguintes características: 340 g kg⁻¹ de argila; pH em H₂O 5,4; 3 mg l⁻¹ de P; 236 mg l⁻¹ de K; 33 g kg⁻¹ de matéria orgânica; 5,2 cmol_c dm⁻³ de Ca; 2,0 cmol_c dm⁻³ de Mg; 0,2 cmol_c dm⁻³ de Al; e 16,9 cmol_c dm⁻³ de CTC.

Dois híbridos de milho de ciclo precoce foram testados: AG 303, híbrido mais cultivado no Brasil no final da década de 1980 e início da década de 1990 (híbrido antigo - HA); e P30F53, híbrido mais cultivado no Brasil desde a safra 2007/2008 (híbrido contemporâneo - HC). Cada híbrido foi avaliado em cinco densidades de plantas, equivalentes a 25.000, 50.000, 75.000, 100.000, e 125.000 pl ha⁻¹, mantendo-se sempre o mesmo espaçamento de 0,7 m entre linhas.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, dispostos em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Os híbridos foram avaliados na parcela principal e as densidades de plantas nas subparcelas. Cada subparcela foi composta por seis linhas com 7 m de comprimento, tendo como área útil as quatro linhas centrais, excluindo 0,5 m na extremidade de cada linha.

A área experimental vem sendo cultivada no sistema de semeadura direta desde 1999, empregando um sistema de rotação com soja e milho no verão e aveia preta e ervilhaca no inverno. O experimento foi implantado nos dias 26 de outubro de 2008 e 20 de outubro de 2009 sobre uma cobertura morta de aveia preta (*Avena strigosa*). Foram utilizadas plantadoras manuais, reguladas para distribuir três sementes por cova. A adubação de manutenção com nitrogênio, fósforo e potássio foi realizada no dia da semeadura com base nos resultados obtidos pela análise de solo e nas recomendações para a cultura do milho da Comissão Sul Brasileira de Química e Fertilidade do Solo RS/SC (2004), almejando produtividades de 12.000 kg ha⁻¹. Aplicaram-se 30 kg de N, 205 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 110 kg ha⁻¹ de K₂O.

Quando as plantas estavam com três folhas expandidas, estágio V3 da escala de Ritchie et al. (1993), efetuou-se o desbaste, deixando apenas uma planta por cova e condicionando cada subparcela a sua população de plantas. Foram feitas duas coberturas nitrogenadas, realizadas nos estádios V4 e V8. Em cada uma delas, aplicaram-se 100 kg de N ha⁻¹.

O controle de plantas daninhas foi efetuado com duas aplicações de herbicida. A primeira foi feita logo após a semeadura com o produto atrazina + s-metolaclor (1.480 + 1.160 g de i.a. ha⁻¹). A segunda foi efetuada em pós-emergência, quando as plantas se encontravam no estágio V3, utilizando o produto

nicosulfuron (56 g de i.a. ha⁻¹). Também foram realizadas duas aplicações preventivas do inseticida lufenuron (15 g de i.a. ha⁻¹) com jato dirigido, para controle da lagarta-do-cartucho [*Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae)], quando as plantas estavam nos estádios V5 e V10. O ensaio foi irrigado nos dois anos agrícolas. Iniciou-se a irrigação sempre que o potencial de água no solo, medido por tensiômetros instalados a 15 e a 30 cm de profundidade, foi inferior a -0,04 MPa.

Para avaliação do efeito dos tratamentos sobre a área foliar verde e senescida, foram selecionadas 10 plantas da área útil de cada subparcela que estivessem no mesmo estágio fenológico (V4), com a máxima homogeneidade morfológica e fenológica possível. Estas plantas foram identificadas com uma etiqueta plástica numerada na base do colmo. A área foliar foi obtida de acordo com metodologia empregada por Tollenaar (1992), medindo-se o comprimento (C) da base à extremidade da folha e a maior largura (L) de todas as folhas fotossinteticamente ativas.

Considerou-se fotossinteticamente ativa toda folha que tivesse pelo menos 50% de sua área foliar verde, de acordo com critério proposto por Borrás et al. (2003). A área foliar (A), expressa em cm², foi estimada aplicando-se a expressão: $A = C \times L \times 0,75$, em que o valor 0,75 é um coeficiente de correção, uma vez que as folhas não apresentam área retangular.

Foram feitas avaliações de área foliar em dois estádios fenológicos: R1 (espigamento) e aos 56 dias após o espigamento (grãos em R5 - massa dura). Segundo a escala de Ritchie et al. (1993), estes estádios correspondem, respectivamente, ao momento em que a cultura apresenta a maior área foliar e ao final da fase atenuativa do período de enchimento de grãos, precedendo a maturação fisiológica. A senescência foliar foi estimada considerando-se o

somatório da área de todas as folhas senescidas, com menos de 50% de sua área verde, em cada época de avaliação.

Avaliou-se a fenologia da cultura no florescimento, estimando o número de dias entre a emergência e o momento em que 50 e 75% das plantas atingiram a antese (pendões com deiscência de pólen) e o espigamento (estilo-estigmas visíveis e com pelo menos 1 cm acima das brácteas que protegem a espiga), respectivamente.

A colheita do ensaio foi feita nos dias 8 de abril de 2009 e 5 de abril de 2010, quando os grãos estavam com um teor de umidade oscilando entre 18 e 20%. Antes da colheita, determinaram-se o número de espigas por planta e a esterilidade feminina. Consideraram-se estéreis as plantas que não tinham espiga ou nas quais a espiga tinha menos de 10 grãos. Após a colheita, determinaram-se o rendimento de grãos e os componentes do rendimento.

Os dados obtidos nos dois anos agrícolas foram avaliados conjuntamente pela análise de variância, utilizando o delineamento de parcelas sub-subdivididas. Nesta análise, os anos agrícolas foram locados nas parcelas principais, os híbridos nas subparcelas e as populações de plantas nas sub-subparcelas. A magnitude do efeito dos tratamentos frente ao erro experimental foi testada através do teste F. Quando os valores de F foram significativos ($p < 0,05$), as médias dos fatores qualitativos foram comparadas entre si pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5% ($p < 0,05$). No caso dos fatores quantitativos, efetuou-se análise de regressão polinomial, testando-se os modelos linear e quadrático. Selecionou-se, para explicar os resultados, o modelo que apresentou maior coeficiente de determinação e que melhor explicou biologicamente o comportamento das variáveis analisadas.

Resultados e Discussão

Não houve efeito significativo do ano agrícola sobre as variáveis analisadas, tanto isoladamente quanto na interação com híbridos e populações de planta. Conseqüentemente, os resultados serão apresentados considerando os valores médios das duas estações de crescimento em que se conduziu o trabalho.

O incremento na densidade de plantas decresceu linearmente a área foliar dos dois híbridos no espigamento (Figura 1A). Os valores de área foliar do híbrido antigo AG 303 (HA) superaram em mais de 1.000 cm² os do híbrido contemporâneo P30F53 em todas as densidades neste estágio fenológico. Por outro lado, as taxas de decréscimo da superfície fotossinteticamente ativa no espigamento com o

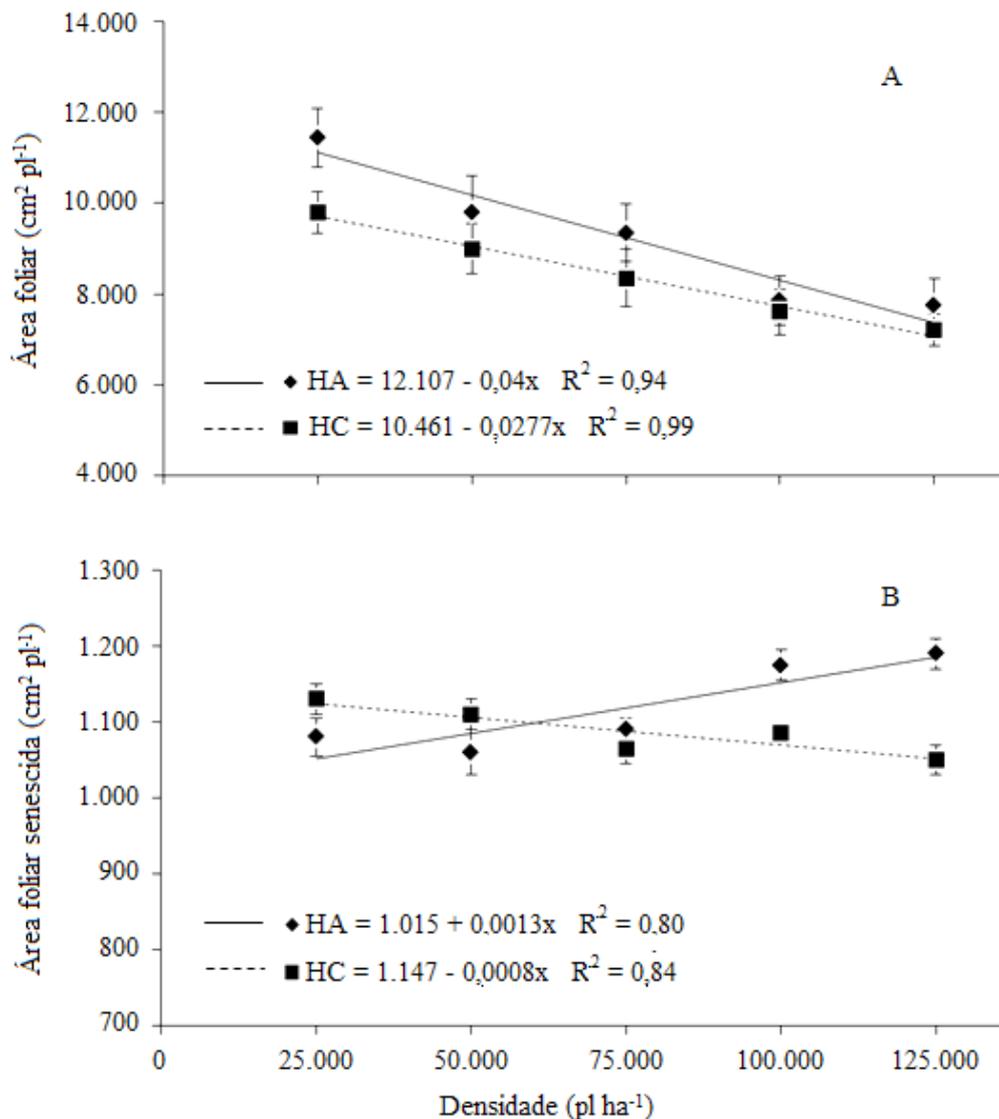


FIGURA 1. Área foliar verde (A) e senescida (B) no espigamento de dois híbridos de milho (HA - híbrido antigo - AG 303 e HC - híbrido contemporâneo - P30F53), em cinco densidades de plantas, na média de dois anos agrícolas. Lages, SC.

incremento da população foram 55% maiores no HA do que no HC.

O HA incrementou linearmente a área foliar senescida durante o espigamento com o aumento na densidade de plantas (Figura 1B). Já para o HC, houve redução na área senescida com a elevação na densidade. A maior proximidade entre as plantas na linha decorrente do adensamento acelera a competição intraespecífica por água, luz e nutrientes (Valentinuz & Tollenaar, 2004; Sangoi et al., 2007). Esta tendência foi observada no AG 303, mas não no P30F53. O comportamento diferencial da área senescida na floração dos dois híbridos provavelmente se deveu à elevada emissão de perfilhos produtivos do HC quando cultivado nas densidades de 25.000 e 50.000 pl ha⁻¹. Esta característica, já reportada por Sangoi et al. (2011) quando o P30F53 foi cultivado em estandes subótimos, fez com que as plantas deslocassem suas reservas para manutenção dos perfilhos na fase vegetativa, acarretando em maior senescência foliar nas folhas basais do colmo principal durante o espigamento deste híbrido nas menores densidades.

As taxas mais altas de decréscimo na área foliar verificadas com o AG 303 no espigamento quando se aumentou a população de plantas se mantiveram durante o enchimento de grãos. Isto fez com que a característica observada em R1, estágio em que o HA apresentou maiores valores de área foliar do que o HC em todas as densidades (Figura 1A), se invertesse na avaliação realizada 56 dias após o espigamento. Este período coincidiu com o final da fase linear e o início da fase atenuativa do enchimento de grãos. No estágio R5 da escala de Ritchie et al. (1993), o HC apresentou maiores valores de área foliar do que o HA em todas as populações testadas no trabalho (Figura 2A). A elevação na densidade de

25.000 para 125.000 pl ha⁻¹ decresceu linearmente a área foliar senescida dos dois híbridos 56 dias após o espigamento (Figura 2B). No entanto, as taxas de decréscimo observadas com o aumento na densidade de 25.000 para 125.000 pl ha⁻¹ foram 2,8 maiores no HA do que no HC. Em R5, o HA apresentou maior área foliar senescida do que o HC em todas as populações avaliadas no ensaio.

O incremento na densidade de plantas aumentou linearmente a duração do subperíodo antese-espigamento dos dois híbridos (Figura 3A). Isto corrobora as observações feitas por Tollenaar & Lee (2002) e Duvick (2004) de que o adensamento acentua a natureza protândrica da planta de milho.

Contudo, as taxas de incremento na defasagem entre o florescimento masculino e o feminino diferiram entre os híbridos. Para cada 10.000 plantas adicionadas à lavoura, o subperíodo antese-espigamento aumentou 0,2 dia para o HC e 0,4 dia para o HA, respectivamente. Isto demonstra que o HC foi mais eficiente do que o HA em sincronizar a dispersão de pólen e a exteriorização dos estigmas com o aumento na densidade de plantas. Resultados semelhantes foram reportados por Duvick & Cassmann (1999) e Sangoi et al. (2002).

Houve um incremento de 4,3% na porcentagem de plantas sem espiga para cada 10.000 pl ha⁻¹ adicionadas ao estande de lavoura do AG 303 (Figura 3B). O aumento na população de plantas não afetou significativamente a esterilidade feminina do P30F53, cuja porcentagem de plantas sem espiga foi inferior a 10%, mesmo nas densidades supraótimas de 100.000 e 125.000 pl ha⁻¹. A elevada porcentagem de plantas estéreis denotada pelo HA nas densidades mais altas foi favorecida pela maior assincronia entre o florescimento masculino e o feminino (Figura 3A).

Como o período de dispersão de grãos de pólen do milho é curto (cinco a sete dias) e a longevidade do pólen pequena (12 a 18 horas), possivelmente quando os estigmas de muitas plantas do AG 303 se exteriorizaram nas maiores densidades não havia mais grãos de pólen disponíveis para a polinização e a fertilização.

Além disto, o estresse ocasionado pelo adensamento pode ter alterado as taxas de transporte de fito-hormônios e carboidratos dentro da planta, tornando as espigas iniciadas tardiamente menos capazes de se tornarem funcionais e produzirem grãos, devido à sua menor capacidade competitiva por fotoassimilados com as demais estruturas da

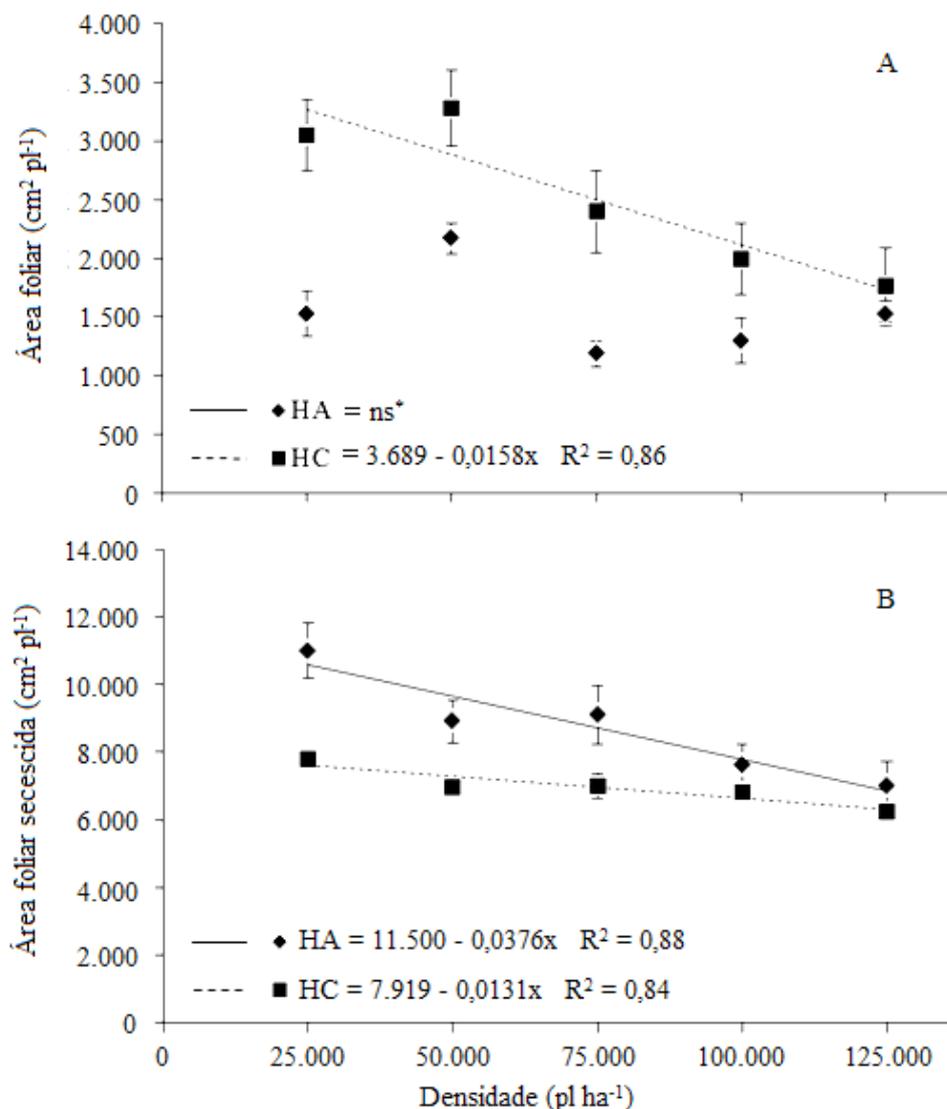


FIGURA 2. Área foliar verde (A) e senescida (B) 56 dias após o espigamento de dois híbridos de milho (HA - híbrido antigo - AG 303 e HC - híbrido contemporâneo - P30F53), em cinco densidades de plantas, na média de dois anos agrícolas. Lages, SC.

planta. Comportamento semelhante foi descrito por Tollenaar et al. (2006).

O rendimento de grãos dos dois híbridos respondeu quadraticamente ao incremento na densidade de plantas (Figura 4). O maior valor absoluto de rendimento para o HC foi registrado no estande de 75.000 pl ha⁻¹, no qual o P30F53 alcançou a produtividade de 12.663 kg ha⁻¹. Para o

HA, o maior rendimento foi observado na densidade de 50.000 pl ha⁻¹, na qual o AG 303 produziu 8.516 kg ha⁻¹. As densidades ótimas, calculadas utilizando-se a primeira derivada das equações quadráticas ajustadas para cada híbrido, foram de 86.665 pl ha⁻¹ para o P30F53 e de 53.044 para o AG 303. Tanto os valores observados quanto os ajustados comprovam a melhor adaptação do HC à

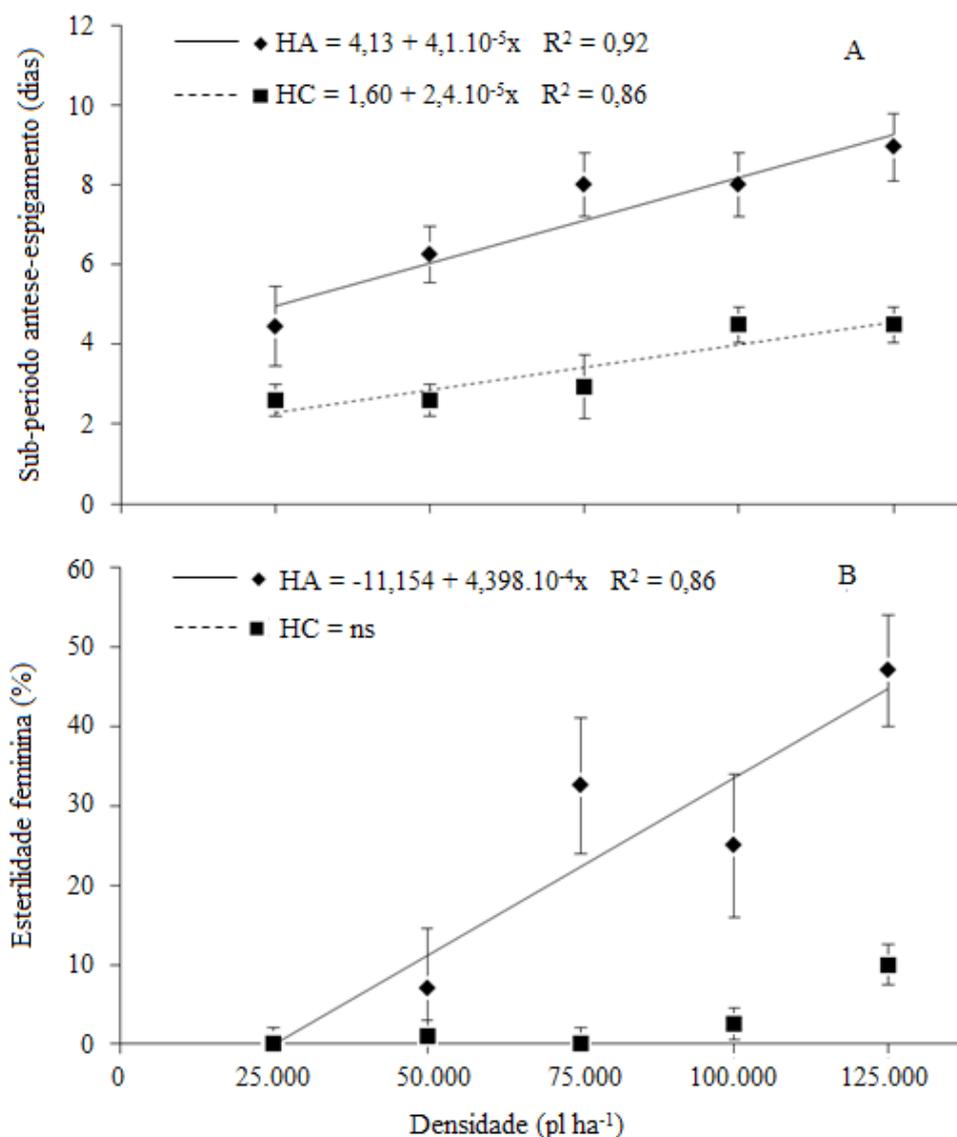


FIGURA 3. Duração do sub-período antese-espigamento (A) e esterilidade feminina (B) de dois híbridos de milho (HA - híbrido antigo - AG 303 e HC - híbrido contemporâneo - P30F53), em cinco densidades de plantas, na média de dois anos agrícolas. Lages, SC.

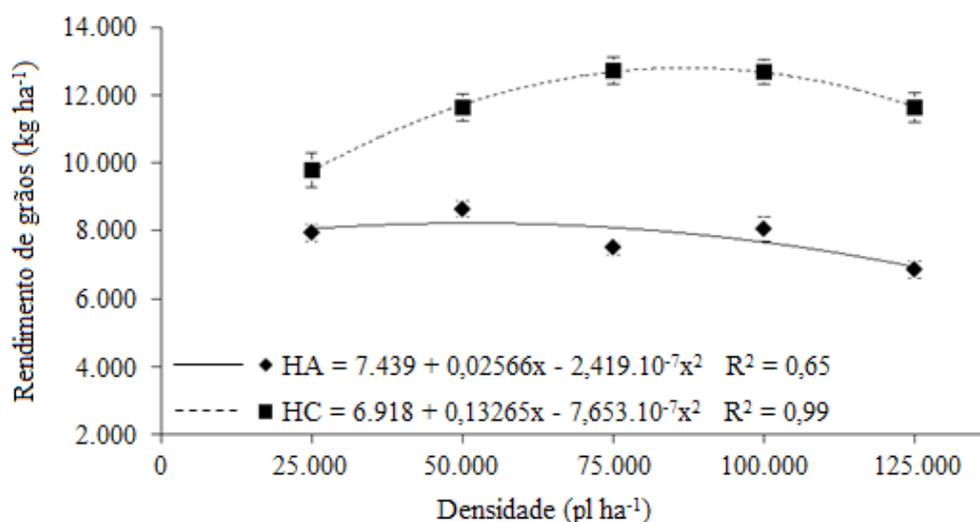


FIGURA 4. Rendimento de grãos de dois híbridos de milho (HA - híbrido antigo - AG 303 e HC - híbrido contemporâneo - P30F53), em cinco densidades de plantas, na média de dois anos agrícolas. Lages, SC.

utilização de populações de plantas mais altas na lavoura, corroborando comportamento reportado na literatura por Tollenaar & Lee (2002), Sangoi et al. (2002), Duvick (2004), Tokatlides & Koutroubas (2004) e Tollenaar & Lee (2006).

O número de grãos por m² é o componente do rendimento que mais interfere na produtividade final dos cereais (Vega et al., 2001). Ele é afetado pela população de plantas, pelo número de espigas por planta e pelo número de grãos por espiga que atingem a maturação fisiológica (Andrade et al., 2002). O HC produziu maior número de grãos por área (Figura 5A) e por espiga (Figura 5B) do que o HA. Isto contribuiu para seu maior rendimento de grãos em todas as populações avaliadas no trabalho (Figura 4). A melhor sincronia entre o florescimento masculino e o feminino (Figura 3A) e a menor esterilidade feminina (Figura 3B) do P30F53 fomentaram a produção de grãos por área em relação ao AG 303, principalmente nas densidades mais altas.

A assincronia floral estimulada pelo estresse causado pelo adensamento excessivo reduz o número de óvulos fertilizados, suprimindo o poder de demanda da espiga durante o enchimento de grãos (Sangoi, 2001). A redução do poder de demanda da espiga contribui para a diminuição da atividade fotossintética das folhas (Rajcan & Tollenaar, 1999a). A menor atividade fotossintética das folhas reduz o suprimento de carboidratos às raízes, o qual é fundamental para absorção de nitrogênio e de outros nutrientes na fase reprodutiva da cultura (Rajcan & Tollenaar, 1999b). Coletivamente, esta sequência de eventos acelera a senescência foliar, encurtando o período de enchimento de grãos e reduzindo o rendimento de grãos.

A melhor adaptação do HC às altas populações de plantas é provavelmente consequência de sua melhor sincronia floral (Figura 3A) e da menor esterilidade feminina (Figura 3B), promovidas por uma natureza protândrica menos acentuada

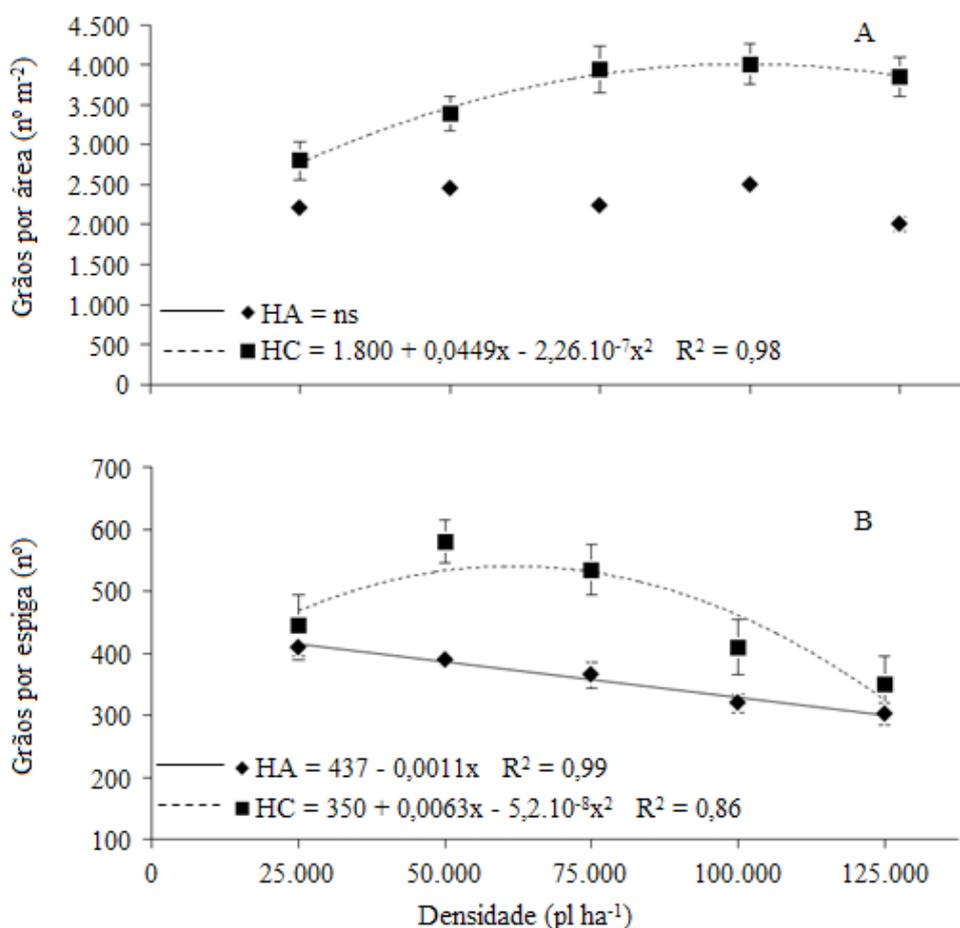


FIGURA 5. Número de grãos produzidos por área (A) e por espiga (B) de dois híbridos de milho (HA - híbrido antigo - AG 303; e HC - híbrido contemporâneo - P30F53), em cinco densidades de plantas, na média de dois anos agrícolas. Lages, SC, Brasil.

da planta e pelo desenvolvimento alométrico mais equilibrado entre as inflorescências masculina e feminina. Estas características possivelmente contribuíram para o estabelecimento de um dreno mais forte logo após a floração. Assim, acredita-se que a maior demanda por fotoassimilados do P30F53 durante o enchimento de grãos favoreceu a manutenção da atividade fotossintética das folhas por um período mais longo (Figura 2A), retardando a senescência foliar (Figura 2B) e contribuindo para a

maior produção de grãos por área (Figura 5A) do híbrido contemporâneo.

Os dados obtidos neste estudo reforçam a hipótese de que existe associação positiva entre tolerância ao adensamento e senescência foliar mais lenta durante o período de enchimento de grãos dos híbridos contemporâneos, conforme reportado por Du Vick & Cassmann (1999), Tollenaar & Lee (2002) e Valentinuz & Tollenaar (2004) em estudos conduzidos na América do Norte.

Conclusões

A maior sincronia entre a antese e o espigamento e a menor esterilidade feminina contribuem para retardar a senescência foliar após o florescimento.

A senescência foliar mais lenta durante o enchimento de grãos contribui para que o híbrido contemporâneo P30F53 seja mais tolerante ao adensamento do que o híbrido antigo AG 303.

Agradecimentos

Ao CNPq, pela bolsa de produtividade em pesquisa ao primeiro autor. À Capes, pelas bolsas de estudos concedidas aos três autores subsequentes.

Referências

- ANDRADE, F. H.; OTEGUI, M. E.; VEGA, C. R. C. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, p. 92-97, 2000.
- ANDRADE, F. H.; OTEGUI, M. E.; VEGA, C. R. C. Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. **Crop Science**, Madison, v. 42, p. 1173-1179, 2002.
- BOOMSMA, C. R.; SANTINI, J. B.; TOLLENAAR, M.; VYN, T. J. Maize morphophysiological responses to intense crowding and low nitrogen availability: an analysis and review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, p.1426-1452, 2009.
- BORRÁS, L.; MADDONI, G.; OTEGUI, M. E. Leaf senescence in maize hybrids: plant population, row spacing and kernel set effects. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 82, p. 13-26, 2003.
- COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre, 2004. 400 p.
- DANGL, J. L.; DIETRICH, R. A.; THOMAS, H. Senescence and programmed cell death. In: BUCHANAN, B. B.; GRUISSSEN, W.; JONES, R. L. (Ed.). **Biochemistry and molecular biology of plants**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. p. 1044-1100.
- DUVICK, D. N.; CASSMAN, K. G. Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. **Crop Science**, Madison, v. 39, p. 1622-1630, 1999.
- DUVICK, D. N.; SMITH, J. S. C.; COOPER, M. Long-term selection in a commercial hybrid maize breeding program. In: JANICK, J. (Ed.). **Plant breeding reviews**. New York: J. Wiley, 2004, p. 109-151.
- HAMMER, G. L.; DONG, Z.; McLEAN, G.; DOHERTY, A. L.; MESSINA, C.; SCHLUSSER, J.; ZINSELMEIER, C. PASZKIEWICZ, S.; COOPER, M. Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the U.S. corn belt? **Crop Science**, Madison, v. 49, p. 299-312, 2009.
- LIU, W.; TOLLENAAR, M. Response of yield heterosis to increasing plant density in maize. **Crop Science**, Madison, v. 49, p. 1807-1816, 2009.
- MADDONI, G. A.; OTEGUI, M. E.; CIRILO, A. G. Plant population Amsterdam density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 71, p. 183-193, 2001.
- MADDONI, G. A.; OTEGUI, M.; ANDRIEU, B.; CHELLE, M.; CASAL, J.J. Maize leaves turn away from neighbors. **Plant Physiology**, Bethesda, v.

- 130, p.1181-1189, 2002.
- RAJCAN, I.; TOLLENAAR, M. Source:sink ration and leaf senescence in maize. 1. Dry matter accumulation and partitioning during grain filling. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 60, p. 245-253, 1999a.
- RAJCAN, I.; TOLLENAAR, M. Source:sink ratio and leaf senescence in maize. 2. Nitrogen metabolism during grain filling. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 60, p. 255-265, 1999b.
- RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. **How a corn plant develops?** Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1993. 26 p. (Special Report, 48).
- SANGOI, L. Understanding plant density effects on maize growth and development: an important issue to maximize grain yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, p. 159-168, 2001.
- SANGOI, L.; GRACIETTI, M. A.; RAMPAZZO, C.; BIANCHET, P. Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 79, p. 39-51, 2002.
- SANGOI, L.; SCHMITT, A.; ZANIN, C. G. Área foliar e rendimento de grãos de híbridos de milho em diferentes populações de planta. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 6, p. 263-271, 2007.
- SANGOI, L.; SILVA, P. R. F.; ARGENTA, G. **Estratégias de manejo do arranjo de plantas para aumentar o rendimento de grãos do milho**. Lages: Graphel, 2010. 65 p.
- SANGOI, L.; SCHWEITZER, C.; SILVA, P. R. F.; SCHMITT, A.; Vargas, V.P.; CASA, R.T.; SOUZA, C. A. Perfilamento, área foliar e produtividade do milho sob diferentes arranjos espaciais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, p. 609-616, 2011.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; OLIVEIRA, J. B.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília, DF, 2006. 306 p.
- TOKATLIDIS, I. S.; KOUTROUBAS, S. D. A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 88, p. 103-114, 2004.
- TOLLENAAR, M. Is low plant density a stress in maize? **Maydica**, Bergamo, v. 37, p. 305-311, 1992.