

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

SELEÇÃO DE GENÓTIPOS E ANÁLISE DA TOLERÂNCIA DO MILHO
(*Zea mays* L.) AO ENCHARCAMENTO DO SOLO

Noryam Bervian Bispo
Engenheira Agrônoma/UPF, Mestre/UFRGS

Tese apresentada como um dos requisitos
à obtenção do Grau de Doutor em Fitotecnia
Ênfase Melhoramento e Biotecnologia Vegetal

Porto Alegre (RS), Brasil
Julho de 2011

NORYAM BERVIAN BISPO
Engenheira Agrônoma - UPF
Mestre em Fitotecnia - UFRGS

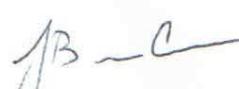
TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

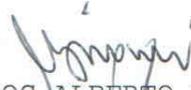
DOCTOR EM FITOTECNIA

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

Aprovado em: 29.07.2011
Pela Banca Examinadora

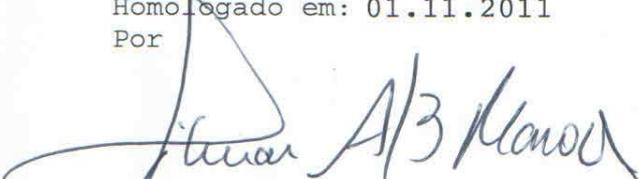

JOSÉ FERNANDES BARBOSA NETO
Orientador - PPG Fitotecnia


ANDRÉ LUIS THOMAS
PPG Fitotecnia


CARLOS ALBERTO BISSANI
PPG Ciência do Solo/UFRGS


ANTONIO COSTA DE OLIVEIRA
UFPeI

Homologado em: 01.11.2011
Por


GILMAR ARDUINO BETTIO MARODIN
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia


PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade
de Agronomia

DEDICO

***Às Marias de minha vida:
Maria de Lourdes, minha
mãe na terra e Maria de
Nazaré, minha mãe no céu.***

“Eis que eu faço novas todas as coisas.”

Ap 21, 5.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que “faz novas todas as coisas”, e me renova a cada dia, tornando possível a realização deste trabalho;

À minha família, meu alicerce, meu porto seguro: meu pai, Eng Agr Mayron Roberto Furtado Bispo, não só por ter me ensinado a amar essa profissão tão maravilhosa, mas principalmente por me incentivar a querer sempre mais do que aquilo que posso obter; minha mãe, Maria de Lourdes, por se alegrar sempre com minhas conquistas, me auxiliar nas minhas angústias, me levantar nas quedas, enfim, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos; aos meus orgulhos, minhas irmãs Mayara, Noara Tammy e Mayllu Helenne, cada uma ao seu jeito, por vocês e pra vocês meninas, concluo este trabalho;

Ao Anderson, pelo companheirismo e amizade, pela imensa ajuda no decorrer destes quatro anos de trabalho e por estar presente em todos os momentos, me ajudando a crescer como profissional e como pessoa;

Ao Professor José Barbosa, pelos seis anos de orientação, pelos ensinamentos e principalmente pelo convívio pacífico e amigável durante este período;

Ao Professor André Thomas, pela ajuda na orientação durante este período;

À Samantha, minha terapeuta, por ajudar a me conhecer melhor, a mudar o que precisava ser mudado e me tornar uma pessoa melhor;

Ao Grupo de Oração Universitário do Bom Fim, e todos os seus componentes, por recarregar as minhas energias semanalmente de uma maneira tão doce e ao mesmo tempo tão profunda;

Ao Frei Ivo, presença viva de Jesus na minha vida nos últimos tempos, sendo imprescindível para a concretização de mais este sonho;

À UFRGS, por ter sido minha segunda casa nestes seis anos de trabalho e ter me acolhido fazendo eu me sentir realmente em casa;

Aos professores e funcionários pelo auxílio no decorrer desta etapa;

Aos colegas que tive no decorrer destes anos, pelas trocas de conteúdos, ensinamentos, experiências e pelo convívio, em especial às gurias Cibele, Letícia, Adriana, Ana Paula, Kelly, Thanise e Caroline pelos momentos de alegria e diversão em meio aos estudos;

À Bárbara e à Natália, grandes amigas e importantíssimas fontes de apoio aqui na Capital;

À CAPES pelo apoio financeiro.

SELEÇÃO DE GENÓTIPOS E ANÁLISE DA TOLERÂNCIA DO MILHO (*Zea mays* L.) AO ENCHARCAMENTO DO SOLO¹

Autor: Noryam Bervian Bispo

Orientador: José Fernandes Barbosa Neto

RESUMO

Os solos de várzea ou hidromórficos têm como principal característica a drenagem natural deficiente. No Rio Grande do Sul, este tipo de solo representa 20% da área, sendo cultivado principalmente em um sistema de arroz e pecuária de corte. O milho pode ser uma alternativa para rotação de culturas em áreas de várzea, entretanto é indispensável o desenvolvimento de genótipos tolerantes ao encharcamento do solo. Este trabalho teve por objetivo avaliar a variabilidade genética da tolerância ao encharcamento do solo em milho, bem como avaliar a complexidade de fatores envolvidos na tolerância ao encharcamento. Uma série de experimentos foi realizada em casa de vegetação para testar a reação de 105 genótipos de milho sob estresse e foram feitas análises de tecido da parte aérea das plantas para avaliar os diferentes fatores envolvidos. Os resultados indicaram a presença de variabilidade genética para a tolerância ao estresse. Em torno de 4% dos genótipos testados demonstraram tolerância, apresentando-se mais verdes e mais vigorosos em relação aos demais no decorrer de cada experimento. A temperatura foi um fator decisivo na avaliação da tolerância, sendo que temperaturas mais altas aumentaram os efeitos nocivos ocasionados pelo encharcamento. O alagamento do solo determinou uma elevação drástica na concentração de ferro e uma redução nos elementos nitrogênio, fósforo, potássio e boro no tecido das plantas. As plantas sensíveis apresentaram teores de sódio significativamente maiores no tecido em comparação com as plantas tolerantes. Como conclusão, é possível selecionar genótipos de milho adaptados às condições de encharcamento do solo, entretanto a análise deste estresse é complexa devido à interação com diversos fatores do ambiente, especialmente a temperatura.

¹ Tese de Doutorado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (64p.) Julho, 2011.

GENOTYPES SELECTION AND MAIZE (*Zea mays* L.) TOLERANCE ANALYSIS TO WATERLOGGING¹

Author: Noryam Bervian Bispo
Adviser: José Fernandes Barbosa Neto

ABSTRACT

Lowland or hydromorphic soils present naturally poor drainage. In Rio Grande do Sul this type of soil represents 20% of the total cultivated area. It is cultivated under a rice and livestock succession system. Maize may be an alternative to crop rotation in these areas, however it is essential to develop waterlogging tolerant genotypes. This study aimed to evaluate the genetic variability for waterlogging tolerance in maize, and to assess the complexity of factors involved in waterlogging tolerance. Several experiments were conducted in greenhouse to test the reaction of 105 maize genotypes. Tissue analysis was additionally performed to evaluate different factors involved. Results indicated genetic variability for stress tolerance. About 4% genotypes showed tolerance, presenting greener leaves and more vigorous during each experiment. Temperature was a decisive factor for tolerance evaluation, where higher temperatures increased stress by flooding. Waterlogging caused an elevation in iron tissue concentration. At the same time nitrogen, phosphorus, potassium, and boron concentration were decreased. Sensitive plants showed significantly higher levels of sodium on the tissues when compared to tolerant plants. As a conclusion, it is possible to select maize genotypes adapted to waterlogging conditions, however stress analysis is complex due to interaction with several environmental factors, especially temperature.

¹ Doctoral thesis in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (64p.) July, 2011.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 A cultura do milho	5
2.2 Solos de várzea	7
2.3 Tolerância ao encharcamento do solo	8
2.3.1 Reações no solo.....	8
2.3.2 Reações na planta.....	12
2.3.3 Genética da tolerância ao encharcamento	17
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1 Estudo 1: Seleção de genótipos de milho ao encharcamento do solo	22
3.2 Estudo 2: Concentração de nutrientes em genótipos contrastantes ...	27
3.2.1 Experimento 1	27
3.2.2 Experimento 2	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 Estudo 1: Seleção de genótipos de milho tolerantes ao encharcamento do solo.....	30
4.2 Efeito da temperatura sobre o estresse provocado pelo encharcamento do solo.....	34
4.3 Estudo 2: Concentração de nutrientes em genótipos contrastantes ...	42
4.4 Perspectivas	51
5 CONCLUSÕES.....	54
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
7 APÊNDICES	63
8 VITA.....	64

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Resultados da análise química do solo coletado no IRGA no ano de 2008. Laboratório de Análises – Departamento de Solos/UFRGS.....	22
2. Relação empresas fornecedoras, tipos de variedades e genótipos de milho avaliados.....	23
3. Número de genótipos encontrados em cada classe, nos dois níveis de encharcamento do solo (solo saturado e solo inundado). UFRGS, outubro de 2008 e fevereiro de 2009.....	31
4. Resumo da análise de variância para os caracteres oxigênio e pH nas duas épocas de condução do experimento.	35
5. Médias de concentração de oxigênio e pH na interação entre nível de água e a presença ou ausência de plantas do meio analisado, nas duas épocas de condução do experimento.	37
6. Resumo da análise de variância para a concentração dos elementos nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, ferro, manganês, sódio, cobre e zinco. UFRGS, junho de 2009.	43
7. Concentração dos nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), em % (m/m), encontrados nos tecidos (parte aérea) dos genótipos submetidos ao alagamento do solo.	44
8. Concentração dos nutrientes boro (B), ferro (Fe), manganês (Mn), sódio (Na), cobre (Cu) e zinco (Zn), em mg.kg ⁻¹ , encontrados nos tecidos dos genótipos submetidos ao alagamento do solo.	45
9. Resumo da análise de variância para os caracteres amônio (NH ₄ ⁺), nitrato (NO ₃ ⁻) e oxigênio (O ₂) na solução do solo e ferro (Fe) e sódio (Na) no tecido das plantas.....	47
10. Médias dos níveis de amônio (NH ₄ ⁺) e nitrato (NO ₃ ⁻), avaliados na solução do solo inundado, na interação entre adição de aeração e de nitrogênio no meio. UFRGS, março de 2010.....	49

11. Médias da concentração de ferro (Fe) e sódio (Na), analisados no tecido das plantas, na interação entre genótipo e nitrogênio. UFRGS, março de 2010.....	50
--	----

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Experimento 1 da seleção de genótipos de milho ao encharcamento do solo. A) Solo saturado; B) Solo inundado. UFRGS, Faculdade de Agronomia, outubro de 2008.....	24
2. Bandeja com encharcamento em solo inundado, mostrando a presença dos tubos para medição da concentração de oxigênio e pH, e os aparelhos medidores (oxímetro e potenciômetro).....	26
3. Plantas demonstrando a escala de notas utilizada. A) Nota 1; B) Nota 2; C) Nota 3.....	26
4. Experimento 2 da concentração de nutrientes em genótipos contrastantes. UFRGS, Faculdade de Agronomia, junho de 2009.....	29
5. Genótipos de milho submetidos à condição de estresse hídrico nas duas épocas de condução do experimento e nos dois níveis de alagamento do solo: A) solo saturado, época outubro; B) solo inundado, época outubro; C) solo saturado, época fevereiro; D) solo inundado, época fevereiro.	38
6. Análise de regressão para os níveis de oxigênio em função dos dias de alagamento nas épocas outubro de 2008 (A) e fevereiro de 2009 (B). 11) solo saturado, sem plantas; 12) solo saturado, com plantas; 21) solo inundado, sem plantas; 22) solo inundado, com plantas.	40
7. Análise de regressão para os níveis de pH em função dos dias de alagamento nas épocas outubro de 2008 e fevereiro de 2009: 11) solo saturado, sem plantas; 12) solo saturado, com plantas; 21) solo inundado, sem plantas; 22) solo inundado, com plantas.....	41
8. Concentração de oxigênio (mg.L^{-1}) durante os oito dias de avaliação do experimento. UFRGS, março de 2010.	48

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS

*	Significativo a 5%;
**	Significativo a 1%;
ADH	Álcool desidrogenase
Al	Alumínio
ANP's	Polipeptídios anaeróbicos
B	Boro
Ca	Cálcio
cm	Centímetros
cmol	Centimol
CONAB	Compania Nacional de Abastecimento
Cu	Cobre
CV%	Coeficiente de variação
dm ³	Decímetro cúbico
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
EROs	Espécies reativas de oxigênio
Fe	Ferro
FEPAGRO	Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária
GL	Graus de liberdade
ha	Hectare
IRGA	Instituto Riograndense do Arroz
K	Potássio
kg	Kilograma
L	Litros
M.O.	Matéria orgânica
mg	Miligrama
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
N	Nitrogênio
Na	Sódio
NH ₄ ⁺	Amônio
NO ₃ ⁻	Nitrato
NS	Não significativo
P	Fósforo
PDC	Piruvato descarboxilase
pH	Potencial Hidrogeônico
QTL	Quantitative Trait Locus
RS	Rio Grande do Sul
S	Enxofre

SC	Santa Catarina
SOD	Superóxido dismutase
sp	Espécie
spp	Espécies
t	Tonelada
UFGRS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USDA	United States Department of Agriculture
Zn	Zinco

1 INTRODUÇÃO

Os solos de várzea ou hidromórficos têm como principal característica a drenagem natural deficiente, normalmente, motivada pelo relevo predominantemente plano, associado a um perfil cuja camada superficial é pouco profunda e a subsuperficial é praticamente impermeável. No Brasil este tipo de solo ocorre em várzeas que, geralmente, apresentam alto potencial de rendimento de grãos para culturas como o milho e a soja, quando adubado corretamente. No entanto, devido ao lençol freático superficial e a chuvas intensas e concentradas, o cultivo dessas espécies fica incerto e instável. Este fato dificulta o estabelecimento de sistemas eficientes de produção envolvendo a cultura do milho nestas áreas agrícolas.

No Rio Grande do Sul, este tipo de solo ocupa uma área de aproximadamente 5,4 milhões de hectares, o que representa 22,8% da área total do Estado (Pinto *et al.*, 1999). O sistema de utilização dos solos hidromórficos do RS compreende na maioria das propriedades, além da cultura do arroz irrigado, a pecuária de corte. O arroz irrigado, apesar do bom rendimento de grãos, apresenta elevados custos de produção e é recomendado que seja semeado na mesma área apenas uma vez a cada três anos. A pecuária de corte, por sua vez, apresenta baixos índices de produtividade, motivados principalmente pela alimentação deficiente em

períodos críticos. Por outro lado, o cultivo continuado do arroz em uma determinada área leva à autolimitação da cultura, isto é, acaba impedindo a continuidade do cultivo devido ao aumento de plantas daninhas, em especial o arroz vermelho. Nas condições do RS, a possibilidade de uso mais intensivo e racional dos solos de várzea está diretamente relacionada à implantação de um sistema de rotação de culturas, associada a uma cobertura permanente da superfície do solo e ao manejo eficiente da água superficial (drenagem e irrigação).

Assim sendo, para que a cultura do milho seja uma alternativa para rotação de culturas em áreas de várzea, é indispensável o desenvolvimento de genótipos tolerantes ao encharcamento do solo. Este caráter é de difícil avaliação a campo, devido à variação de ambiente. Da mesma forma, ele está relacionado com a ação coordenada de adaptações morfológicas, anatômicas e bioquímicas, o que confere complexidade aos estudos genéticos. Isto leva à necessidade de trabalhos em torno da fisiologia e da genética da tolerância ao encharcamento em milho, identificando mecanismos e possíveis genes envolvidos no caráter. Uma maior eficiência na identificação de genótipos superiores adaptados às condições de várzea também poderá ser alcançada pelo desenvolvimento de métodos de pesquisa que possam ser realizados em cultivos de curta duração em casa de vegetação, facilitando a seleção de progenitores em programas de melhoramento genético.

O milho possui variabilidade genética para a tolerância ao encharcamento do solo. Este caráter já foi estudado em diversas culturas como trigo, soja, ervilha dentre outras, porém cada um com métodos de análise diferentes, diferentes tipos de solo, diferentes estádios de desenvolvimento das

culturas, sendo difícil a comparação entre os mesmos e a indicação de um melhor método de análise da tolerância. Assim sendo, os objetivos deste trabalho foram avaliar a variabilidade genética para o caráter tolerância ao encharcamento do solo em diferentes genótipos de milho encontrados no sul do Brasil e avaliar a complexidade de fatores envolvidos na tolerância ao encharcamento do solo nas plantas de milho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O milho (*Zea mays L.*) é uma espécie amplamente difundida, sendo cultivado em praticamente todas as regiões do mundo. O maior produtor mundial deste cereal é os Estados Unidos (USDA, 2011) seguido do Chile e Argentina, sendo que o Brasil ocupa o quarto lugar. Mesmo assim, o país ainda importa grande quantidade de milho, o que sugere a necessidade de incrementar a produção deste cereal. Este aumento na produção de grãos de milho é uma demanda importante, principalmente para os estados do sul do Brasil, onde o Rio Grande do Sul tem uma produtividade média de apenas 4.860 kg.ha⁻¹, média um pouco acima da média brasileira (Conab, 2011). O aumento na produtividade de grãos pode ser obtido pela melhoria do manejo da cultura, assim como pelo uso de cultivares com alto potencial de rendimento de grãos e bem adaptados às condições edafo-climáticas.

A expansão da fronteira agrícola com a cultura do milho é dificultada pela concorrência com a soja (Silva *et al.*, 2006). Assim sendo, os solos de várzeas da região sul do Brasil, que no Rio Grande do Sul ocupam uma área aproximada de 5.400.000 ha (Pinto *et al.*, 1999) aparecem como alternativa viável para o incremento da área cultivada com milho.

2.1 A cultura do milho

O milho é originado das Américas e foi o principal alimento dos nativos americanos (Poehlman & Sleper, 1995). É uma das principais espécies cultivadas no mundo, tendo sua produção voltada principalmente à alimentação animal. No ano agrícola de 2009/10, foram produzidas 34,1 e 21,9 milhões de toneladas de grãos na safra e safrinha, respectivamente, no Brasil, com uma produtividade média de $4.412 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Conab, 2011).

A idade estimada do milho é de 11 milhões de anos e o seu surgimento teria sido resultado de um evento de poliploidização que teria ocorrido após a divergência entre sorgo e milho sendo, portanto, considerado um poliplóide antigo (Gaut *et al.*, 2000). Durante muitos anos, acreditava-se que este cereal era diplóide e que tinha evoluído por meio de seleção e através de recombinações entre genótipos (Mangelsdorf, 1974; Galinat, 1977; Goodman, 1987). Entretanto, hoje existem evidências de que o milho possui uma origem alotetraplóide, com $2n = 4x = 20$ cromossomos (Gaut *et al.*, 2000), tendo o número básico de cromossomos de $x = 5$ (Molina *et al.*, 1992; White & Doebley, 1998; Poggio *et al.*, 2000). A verdadeira origem do milho ainda não foi completamente elucidada, porém existem alguns trabalhos indicando que seu progenitor seja *Zea mays ssp. mexicana* ou *Zea mays ssp. parviglumis*, ambos conhecidos como teosinto (Galinat, 1977; 1992; White & Doebley, 1998; Paterniani & Campos, 1999; Wang *et al.*, 1999; Piperno & Flannery, 2001). Como o teosinto é uma planta selvagem e o milho é conhecido somente como uma espécie cultivada, a interpretação mais relevante é que o milho foi domesticado do teosinto. Provavelmente, as diferenças mais notáveis em suas morfologias foram resultado da seleção humana durante o processo de

domesticação (Doebley *et al.*, 1994; Doebley, 2004). A redução no tamanho de população durante a domesticação deveria ter causado uma diminuição na diversidade genética do milho em relação ao teosinto, sendo que dados de isoenzimas indicam uma perda de cerca de 25% da diversidade genética (Doebley *et al.*, 1990).

O genoma do milho ainda hoje é fonte de grande diversidade fenotípica e molecular. Tanto que, genótipos exóticos e elites de milho contêm mais diversidade que humanos e chimpanzés, e muitas plantas selvagens considerando seqüências de DNA. A seleção seguiu da seguinte forma: alelos favoráveis em locos controlando morfologia de planta e qualidade nutricional do grão foram fixados nos últimos 4.400 anos, e a seleção pelos nativos americanos tornou o milho adaptado a numerosos ambientes (Buckler *et al.*, 2006). Dessa forma, é importante ressaltar que a domesticação do milho contribuiu efetivamente com o seu desenvolvimento evolutivo, como se a ação humana tivesse, aos poucos, moldado ou até mesmo construído uma espécie através da seleção de características importantes durante milhares de anos, o que resultou em uma espécie de grande importância econômica mundial, porém extremamente dependente do homem (Poehlman & Sleper, 1995).

Pelo grande número de variedades existentes e o aprimoramento dos métodos de melhoramento genético, criando novas variedades e híbridos, esse cereal encontra possibilidade de cultivo em uma larga faixa do globo, com grandes variações climáticas, apesar de sua origem tropical. Entretanto, em questão de solo, os mais recomendados para a cultura do milho são os solos de textura média, com teores de argila em torno de 30-35% ou mesmo argilosos com boa estrutura, como os latossolos, que possibilitam drenagem

adequada, apresentam boa capacidade de retenção de água e de nutrientes disponíveis para as plantas (Landau *et al.*, 2010).

2.2 Solos de várzea

Os solos de várzea, encontrados nas planícies de rios e lagoas no Rio Grande do Sul, apresentam como característica comum a formação, em condições variadas, de deficiência de drenagem (hidromorfismo). Ocupam extensas áreas, com relevo variando de plano a suavemente ondulado, abrangendo aproximadamente 5,4 milhões de hectares (Pinto *et al.*, 1999), o que representa em torno de 20% da área total do Estado. São áreas contínuas, mecanizáveis e facilmente irrigadas, sendo encontradas principalmente nas regiões do Litoral, Encosta do Sudeste, Depressão Central, Campanha e Campanha/Missões (Gomes *et al.*, 2002). As classes de solos predominantes nestas áreas são gleissolos, planossolos, plintossolos e vertissolos (Streck *et al.*, 2008).

Associada à má drenagem, os solos hidromórficos apresentam ainda, em sua maioria, densidade naturalmente elevada, relação micro/macroporos muito alta e baixa capacidade de armazenamento de água na camada superficial. Outro aspecto relevante que caracteriza estes solos é a fertilidade natural de média a baixa, o que dificulta a utilização de uma agricultura diversificada. Assim, em tais condições, desenvolveu-se o sistema produtivo com pecuária de corte extensiva e arroz irrigado, que apresentam uma rentabilidade limitada (Gomes *et al.*, 2002).

Nas condições do RS, a possibilidade de uso mais intensivo e racional dos solos de várzea está diretamente relacionada à implantação de um sistema

de rotação de culturas, associada a uma cobertura permanente da superfície do solo e o manejo eficiente da água superficial (drenagem e irrigação) (Gomes *et al.*, 2002). Neste sentido, o milho apresenta variabilidade genética para tolerância ao encharcamento do solo (Lemkekeyes & Sachs, 1989; Sachs *et al.*, 1996; Silva *et al.*, 2007); entretanto, estudos sobre as bases genéticas da tolerância ao encharcamento são escassos.

2.3 Tolerância ao encharcamento do solo

2.3.1 Reações no solo

Quando o solo é alagado, a água substitui o ar nos espaços porosos do solo e, ao comprimir o ar remanescente dentro dos referidos espaços, leva à destruição dos agregados (Sousa *et al.*, 2010). A substituição do ar pela água nos espaços porosos e o estabelecimento de uma lâmina de água sobre o solo restringem as trocas gasosas com a atmosfera. Com o consumo de oxigênio pelos organismos do solo, formam-se duas camadas distintas, uma mais superficial, oxidada, e outra abaixo, reduzida (Sousa *et al.*, 2010).

As características químicas de um perfil de solo alagado são bastante diferentes daquelas de solos bem drenados. Na camada reduzida, há predominância de micro-organismos anaeróbicos, visto que o oxigênio praticamente desaparece do solo (Camargo & Tedesco, 2004). Nesta camada, os cátions predominantes são o Fe^{+2} e o Mn^{+2} , resultantes da redução microbiológica de óxidos de ferro e de manganês. Além disso, o nitrogênio inorgânico está na forma de NH_4^+ e não ocorre nitrificação (Camargo & Tedesco, 2004).

A inundação do solo causa uma variedade de mudanças físicas, químicas e biológicas que alteram a capacidade dos solos de suportar o crescimento das plantas (Kozlowski, 1997). Inundações e submergência, comuns em solos de várzea, levam à redução de trocas gasosas entre o tecido da planta e a atmosfera. O O_2 é difundido dez mil vezes mais lentamente em água do que no ar (Armstrong, 1979). O desequilíbrio entre a lenta difusão do oxigênio e a velocidade com que o mesmo é consumido por micro-organismos e raízes torna o solo inundado desprovido de oxigênio nas camadas superiores, ficando os tecidos das raízes deficientes em oxigênio dentro de poucas horas (Visser *et al.*, 2003). Como raízes e rizomas são órgãos essencialmente aeróbicos, a consequência pode ser fatal, pois, ao cessar a respiração aeróbica os níveis de energia caem rapidamente, causando um dramático declínio em absorção e transporte de íons (Huang *et al.*, 2003; Visser *et al.*, 2003).

Grande parte dos micro-organismos de solo são heterotróficos, isto é, obtêm a energia necessária para o crescimento pela oxidação da matéria orgânica. Nessa reação de oxidação biológica, há transferência de elétrons do carbono orgânico para um receptor de elétrons (Camargo & Tedesco, 2004). Nos solos oxidados, o receptor de elétrons é o O_2 , que é reduzido para CO_2 . Como na camada reduzida não há O_2 livre, os micro-organismos anaeróbios facultativos e anaeróbios obrigatórios utilizam outros compostos (que possuem oxigênio na molécula) como receptores de elétrons (Camargo & Tedesco, 2004). Sendo assim, para que ocorra redução, há necessidade da presença de micro-organismos e de matéria orgânica, e quanto maior o teor de matéria orgânica facilmente decomponível pelos micro-organismos, mais intensa e

rápida será a redução. Como principais receptores de elétrons em meio alagado, pode-se citar nitrato, óxidos mangânicos (Mn^{+4}), óxidos férricos (Fe^{+3}) e sulfatos, que são reduzidos para N_2 , óxidos manganosos (Mn^{+2}), óxidos ferrosos (Fe^{+2}) e H_2S , respectivamente (Sousa *et al.*, 2010).

Os micro-organismos anaeróbios podem utilizar também receptores de elétrons de origem orgânica, caracterizando um processo conhecido como fermentação (Sousa *et al.*, 2010). Na fermentação, compostos orgânicos complexos são transformados em substâncias mais simples, muitas das quais transitórias, tais como ácidos orgânicos, alcoóis, aminas e mercaptanos. A fermentação é responsável pela produção de metano, podendo produzir ainda certa quantidade de amônio (Sousa *et al.*, 2010). Diversos autores (Kronzucker *et al.*, 2000; Britto & Kronzucker, 2002; Thomas & Sodek, 2005; Holzschuh *et al.*, 2009) relatam que o nitrogênio fornecido na forma de NH_4^+ causa uma série de distúrbios fisiológicos no interior e no exterior das células, causando toxidez para as plantas. Em solos alagados, há um acúmulo de NH_4^+ devido à ausência de oxigênio, o que interrompe a nitrificação (Thomas & Sodek, 2005). A toxidez por NH_4^+ é apontada como variável entre as espécies, podendo ser tolerado por algumas, como tem sido atribuído à cultura do arroz (Kronzucker *et al.*, 2000; Britto & Kronzucker, 2002). Os efeitos da toxidez por NH_4^+ normalmente resultam em redução no crescimento de raízes e da parte aérea das plantas e em menor quantidade de nitrogênio absorvido (Holzschuh *et al.*, 2009).

Outros efeitos importantes que acontecem no solo alagado são o aumento no pH e aumento na disponibilidade de alguns nutrientes. O alagamento do solo eleva o pH do meio até próximo à neutralidade (Sousa *et*

al., 2010). O pH de solos ácidos sofre um pequeno decréscimo nos primeiros dias de alagamento, diminui a um valor mínimo e sobe em seguida, para estabilizar-se entre 6,5 e 7,0. Já em solos alcalinos, o pH sofre um leve decréscimo, ou permanece próximo aos valores originais (Sousa *et al.*, 2010). Devido ao aumento do pH e à dissolução de óxidos de ferro que retém o fósforo, há em geral um aumento do fósforo na solução do solo após o alagamento (Camargo & Tedesco, 2004). Cátions como potássio, cálcio e magnésio, embora não participem diretamente das reações de oxirredução, têm a solubilidade aumentada, pois são deslocados para a solução do solo pelo manganês e, principalmente, pelo ferro, que ocupa proporção considerável dos sítios de troca (CTC) em função de sua alta concentração. Dessa forma, cálcio, magnésio e potássio apresentam comportamento que depende da cinética do ferro e do manganês no solo (Camargo & Tedesco, 2004).

Considerando que as pesquisas conduzidas a campo, para determinação de tolerância à deficiência de oxigênio no solo, são necessárias, mas de difícil execução, uma vez que existem fatores nas relações solo-água-clima-planta que não podem ser quantificadas, nem controladas adequadamente, Lopes *et al.* (1988) sugerem métodos de "*screening*" em condições artificialmente controladas, para serem utilizados como ferramentas auxiliares ao trabalho de melhoramento genético de plantas, sob condições de estresse. Entretanto, Setter *et al.* (2009) afirmam que a época, duração e severidade do alagamento é frequentemente diferente em diferentes triagens, o que faz a comparação de variedades difícil de interpretar, isto é, uma variedade pode ser tolerante ao encharcamento nos estádios de germinação e emergência, mas não ser tolerante nos estádios vegetativo ou reprodutivo.

2.3.2 Reações na planta

Para reduzir os impactos do estresse causado por deficiência de oxigênio, as plantas podem desenvolver características morfológicas e bioquímicas que são ambas constitutivas ou induzidas pelo evento da inundação. Várias respostas anatômicas facilitam o transporte interno de oxigênio por difusão ou, algumas vezes, por fluxo de massa (Aschi-Smith *et al.*, 2003). Isto permite que órgãos subterrâneos evitem o desenvolvimento de interiores com níveis muito baixos de oxigênio. De particular importância é o desenvolvimento de aerênquimas, canais que permitem as trocas gasosas entre as partes da planta. Eles criam uma rede de baixa resistência para o transporte de gases da parte aérea, bem aerada, para as raízes que se encontram em condição anaeróbica (Colmer, 2003). A efetividade do aerênquima pode ser aumentada pela formação de barreiras de gás, na epiderme e exoderme nas raízes, que inibem a perda de oxigênio das raízes para o solo em condição de hipoxia ou anoxia. Nessas condições, a água ocupa os espaços antes preenchidos pelo ar, gerando uma situação de hipoxia (deficiência de O₂), que pode chegar à anoxia (ausência de O₂) em algumas regiões do solo em razão da respiração dos órgãos submersos de plantas ou dos microrganismos ali existentes (Kozlowski, 1997).

A maioria das espécies vegetais cultivadas tem seu desenvolvimento e produção prejudicados em solos mal drenados. Sem oxigênio livre, a maioria das plantas não é capaz de sobreviver mais do que poucas horas ou dias e não podem se desenvolver suficientemente para a reprodução sexuada ou assexuadamente (Vartapetian & Jackson, 1997). Outros fatores que contribuem

para o desequilíbrio fisiológico das plantas nessas condições são a baixa disponibilidade de água e de minerais causados por um decréscimo na permeabilidade das raízes, desequilíbrio de hormônios relacionados com as raízes, decréscimo de nitrogênio disponível no solo, incremento de compostos tóxicos no solo e na planta e aumento de organismos patogênicos (Vartapetian & Jackson, 1997). As perdas em rendimento de grãos em trigo podem chegar a 10, 25 e até 65% em solos com baixo, moderado ou severo nível de encharcamento, respectivamente (McDonald & Gardner, 1987).

Espécies diferem consideravelmente em sua suscetibilidade ao estresse. A tolerância pode variar de somente poucas horas para muitos dias ou semanas, dependendo da espécie, dos órgãos diretamente afetados, estágio de desenvolvimento e condições de temperatura (Vartapetian & Jackson, 1997). Depois de uma ampla revisão sobre o assunto, Kawase (1981) observou que existem claras evidências de que as plantas tolerantes ao encharcamento possuem um sistema de transporte de oxigênio para as raízes bem mais desenvolvido do que as não tolerantes.

Em trabalho realizado com encharcamento do solo em milho na fase vegetativa, de floração e de enchimento de grãos, por períodos que variaram de dois a oito dias, foi evidenciado que a cultura é muito sensível ao excesso hídrico do solo, principalmente na fase vegetativa e de floração, e o dano causado aumenta diretamente com a duração do encharcamento (Schild *et al.*, 1999). Zaidi *et al.* (2004) observaram que em condições de excesso de umidade houve uma grande mortalidade das plantas de milho, além de crescimento atrofiado, reduzida área foliar e produção de biomassa em todos os estágios fisiológicos estudados. No entanto, os autores notaram que o milho

é mais suscetível ao estresse nos estágios iniciais de desenvolvimento da cultura e que a susceptibilidade decresceu gradualmente nos estágios mais tardios.

Em nível metabólico, a baixa disponibilidade de oxigênio induz alterações na expressão de genes nas plantas (Silva *et al.*, 2007). Um grupo de 20 polipeptídios anaeróbicos (ANP's) foram seletivamente sintetizados em raízes primárias de milho após cinco horas de anoxia (Sachs *et al.*, 1980). No mesmo tempo, a síntese de proteínas aeróbica foi na sua maioria reprimida. Subbaiah & Sachs (2003), entretanto, afirmaram que a síntese de ANPs ocorre a partir de 90 minutos de anoxia. Esses polipeptídios anaeróbicos têm sido bastante estudados em milho e, de maneira geral, estão envolvidos na glicólise e fermentação, tais como álcool desidrogenase (Sachs & Freeling, 1978; Russell & Sachs, 1992; Andrews *et al.*, 1993), lactato desidrogenase (Kennedy *et al.*, 1992), piruvato descarboxilase (Wignarajah & Greenway, 1976; Laszlo & Lawrence, 1983); e frutose-1,6 bifosfato aldose (Kennedy *et al.*, 1992).

O estresse por encharcamento do solo normalmente não ocorre sozinho. Assim como em outros estresses, há uma grande produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) quando as plantas são submetidas ao alagamento do solo. As conseqüências do estresse oxidativo induzido pelo encharcamento do solo dependem do tecido e/ou espécie, propriedades das membranas, conteúdo antioxidante endógeno e da habilidade de induzir respostas no sistema antioxidante (Sairam *et al.*, 2009a). Sairam *et al.* (2009b) observaram um aumento na produção de várias EROs, especialmente O_2^- e H_2O_2 , em ervilha d'angola submetida ao encharcamento do solo. Há também a interação do estresse com altas temperaturas, principalmente quando a cultura é

semeada no verão. A razão de diminuição nos níveis de oxigênio no solo é maior quando a temperatura do solo aumenta (Wang *et al.*, 2009). Há ainda uma possível interação do estresse por encharcamento do solo com a salinidade. O efeito da salinidade ocorre devido o aumento nos teores de sódio e cloro na parte aérea das plantas submetidas ao estresse (Barrett-Lennard, 2003). Entretanto, a severidade deste estresse está relacionada com o tipo de solo e com a espécie de planta analisada. Em algumas espécies como ervilha e tomate, a inundação induz o fechamento estomático, aparentemente sem mudanças detectáveis no potencial hídrico da folha (Taiz & Zeiger, 2009).

Durante o estresse por encharcamento a planta fica sujeita a uma situação de hipoxia, na qual necessita utilizar o metabolismo anaeróbico para suprir suas necessidades de energia. A fermentação láctica ocorre nos primeiros 20 minutos de hipoxia (Dennis *et al.*, 1993), mas não persiste devido à acidificação que provoca no citosol. Além disso, o rendimento líquido de ATP na fermentação é de apenas dois moles por mol de hexose respirada, comparados com 36 moles de ATP por mol de hexose respirada na respiração aeróbia (Taiz & Zeiger, 2009).

A acidose, acidificação do citoplasma, é a principal causa de morte da célula de raízes de plantas submetidas ao estresse. Ocorre devido ao colapso entre o vacúolo e o citoplasma, que com o tempo, perde prótons (H^+) do vacúolo para o citoplasma, baixando o pH (Roberts *et al.*, 1984). As plantas tolerantes são aquelas que conseguem passar mais rapidamente da fermentação láctica para a alcoólica e, por mais tempo, não só reter a acidificação, como também alcalinizar o meio (Kennedy *et al.*, 1992). No entanto, a morte pode ocorrer também após o período de hipoxia, por lesões

causadas aos lipídios de membrana e proteínas por radicais superóxidos. Primeiro o tecido perde a consistência, logo após, desintegra-se. Provavelmente, espécies tolerantes tenham melhor proteção através do acúmulo de anti-oxidantes e pela indução de enzimas superóxido dismutase (SOD) (Armstrong *et al.*, 1994).

No milho, quando ocorre uma pequena queda de pH no citoplasma de 7,3 para 6,8, entra em ação a fermentação alcoólica, com a atividade das enzimas piruvato descarboxilase (PDC) e álcool desidrogenase (ADH), levando o piruvato proveniente da glicólise, primeiro a aldeído acético, pela ação da PDC e, finalmente, a etanol, pela ação da ADH (Kennedy *et al.*, 1992). O etanol, produto final da fermentação alcoólica, é potencialmente tóxico quando se acumula no interior da célula; no entanto, dificilmente chega a níveis fitotóxicos devido às diversas possibilidades da sua eliminação pela planta (Armstrong *et al.*, 1994). Já o aldeído acético, o intermediário entre o piruvato e o etanol, acumula-se causando danos à célula, principalmente quando ocorre a reoxidação do meio e a reação aldeído acético \Rightarrow etanol reverte, ocasionando um excesso deste no citosol (Pfistersieber & Brandle, 1994).

Para Zhou (2010), a tolerância ao encharcamento do solo é definida em estudos fisiológicos como a sobrevivência ou a manutenção das taxas de crescimento sob o estresse, em diferentes estádios de desenvolvimento, em relação a condições não alagadas, enquanto que a definição agrônômica da tolerância ao encharcamento é a manutenção de um rendimento de grãos relativamente alto, em comparação com as condições normais (sem alagamento). No entanto, a tolerância ao encharcamento do solo é comumente um caráter complexo, afetado por vários mecanismos e complicado por fatores

de confundimento, tais como temperatura, estágio de desenvolvimento da planta, disponibilidade de nutrientes, tipo de solo e topografia do subsolo (Zhou, 2010).

Nas últimas duas décadas, um grande conteúdo de informação em nível molecular, bioquímico, fisiológico, anatômico e morfológico tem sido acumulado sobre respostas de plantas ao alagamento e hipoxia (Kennedy *et al.*, 1992; Vartapetian & Jackson, 1997; Vantoai *et al.*, 2001; Subbaiah & Sachs, 2003; Zaidi *et al.*, 2004; Thomas & Sodek, 2005; Agarwal & Grover, 2006; Thomas & Sodek, 2006; Bailey-Serres & Voeselek, 2008; Board, 2008; Sairam *et al.*, 2009b; Setter *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2009; Irfan *et al.*, 2010). Entre os critérios usados para avaliação da tolerância ao encharcamento em soja, é possível citar a sobrevivência, coloração da folha, estatura de planta, biomassa de raiz e parte aérea, conteúdo de clorofila e rendimento de grãos (Vantoai *et al.*, 2001). Entretanto, Zhou (2010) afirma que entre os diferentes critérios de seleção de genótipos que podem ser utilizados, a clorose da folha tem sido um dos melhores índices usados para diversas culturas.

2.3.3 Genética da tolerância ao encharcamento

A variabilidade genética para tolerância à hipoxia ocorre em diversas espécies, como arroz (Setter *et al.*, 1997), soja (Vantoai *et al.*, 1994), trigo (Boru *et al.*, 2001) e milho (Lemkekeyes & Sachs, 1989; Sachs *et al.*, 1996; Subbaiah & Sachs, 2003). No caso do arroz, Setter *et al.* (1997) sugeriram que um gene para um fator de transcrição poderia estar envolvido na expressão de uma cascata de múltiplos genes que conferiam a tolerância à submergência. Para trigo, Boru *et al.* (2001) indicaram que a tolerância ao encharcamento é

um caráter quantitativo. Zhou (2010) também afirmou que a tolerância ao encharcamento pode ser considerada um caráter quantitativo e com herdabilidade estimada em mais de 70%. Entretanto, Sachs *et al.*(1996) verificaram que a ação gênica da tolerância ao encharcamento era de dominância com poucos genes governando a manifestação do caráter. Segundo Subbaiah & Sachs (2003), resultados de cruzamentos entre os genótipos tolerantes à hipoxia com a linhagem sensível (Mo20W) e a linhagem (B73Ht) normal mostraram que a característica de tolerância era dominante, apresentando segregação simples.

Reyna *et al.* (2003) afirmaram que o melhoramento para tolerância à estresses controlado por múltiplos genes é difícil devido à baixa herdabilidade, variabilidade entre tratamentos e dificuldade de avaliar um grande número de progênies no campo ou em casas de vegetação. Devido a isso, a seleção assistida por marcadores poderia ser útil. *Loci* de caracteres quantitativos (QTLs) para tolerância ao encharcamento têm sido detectados em arroz (Xu & Mackill, 1996), soja (Vantoi *et al.*, 2001) e milho (Silva *et al.*, 2005). Silva *et al.* (2005) indicaram que genes para a tolerância ao encharcamento do solo apresentavam expressões distintas nas raízes e na parte aérea das plantas. Entretanto, este é um caráter que ainda precisa ser melhor analisado, devido aos diferentes métodos e genótipos estudados pelos vários autores.

Mecanismos transcricionais e pós-transcricionais têm sido atribuídos no controle nuclear da expressão gênica em resposta à submergência e ao estresse por encharcamento do solo (Zhang *et al.*, 2008). Dados de transcriptoma têm mostrado que os níveis de expressão de um número de genes são alterados em células de raízes submersas. Estes genes estão

envolvidos em processos bioquímicos, celulares e fisiológicos, incluindo glicólise, metabolismo de energia, metabolismo de lipídeos, transdução de sinal, transcrição de DNA, biossíntese de proteínas e digestão, componentes celulares e fotossíntese (Zhang *et al.*, 2008). Bailey-Serres e Chang (2005) indicam que os genes que são induzidos por anoxia e hipoxia são extremamente diversos e incluem proteínas envolvidas no catabolismo de carboidratos, glicólise, fermentação, metabolismo de lipídeos, síntese de etileno, processos mediados por auxina, melhoria de EROs, cálcio, transdução de sinal mediada por EROs e transcrição gênica.

A maioria dos genes descritos que são induzidos por hipoxia ou anoxia codificam enzimas do metabolismo glicose-fosfato (principalmente glicólise e fermentação) apresentando assim, uma limitada produção de energia em face de um limitado fornecimento de oxigênio (Subbaiah & Sachs, 2003). Entretanto, alguns autores descobriram alguns genes com função fora do caminho glicolítico, como o gene *aie* (*anaerobically inducible early*) em arroz (Huq & Hodges, 1999) e *xet1* (*xyloglucan endotransglycosylase*) em milho (Saab & Sachs, 1995; 1996).

A produção de plantas cultivadas que possam combinar altos rendimentos de grãos com aumento fenotípico da tolerância ao encharcamento, usando ferramentas e técnicas de melhoramento clássico, tem sido um importante objetivo há décadas (Agarwal & Grover, 2006). Entretanto, a experiência adquirida até agora é que esta é uma situação extremamente complexa por diferentes razões. Primeiro, o encharcamento do solo parece ser um estresse com muitos fatores que envolvem uma mistura entre vários elementos bióticos e abióticos. Segundo, diferentes grupos de pesquisa pelo mundo tem usado

mecanismos variados para submeter as plantas ao encharcamento e acessar a sua performance (Agarwal & Grover, 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os trabalhos foram realizados nas estufas do Departamento de Plantas de Lavoura da Faculdade de Agronomia da UFRGS. O solo de várzea utilizado em todos os experimentos, classificado como gleissolo, foi proveniente do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), localizado em Cachoeirinha – RS, sendo coletados em torno de 5m³ de solo em 2008. Sub-amostras deste solo foram separadas conforme recomendações técnicas de análise de solo e encaminhadas para o Laboratório de Análise de Solo da Faculdade de Agronomia da UFRGS.

O laudo completo de análise de solo pode ser visto no Anexo 1. Este solo é classificado como gleissolo devido a grande quantidade de argila encontrada pela análise de solo (Tabela 1). Os gleissolos são caracterizados também por apresentarem um horizonte com cores cinzentas (horizonte glei), imediatamente abaixo do horizonte A, ou que começa dentro de 50 cm da superfície, indicativo de formação em ambiente de redução devido à saturação por água durante um longo período do ano. Sua textura é média ou argilosa em todos os horizontes, não apresentando horizonte B textural associado à mudança textural abrupta, o que os diferencia dos Planossolos (Embrapa, 1999). A análise do solo coletado no IRGA mostrou um alto teor de argila, pH ácido e baixa quantidade de matéria orgânica (Tabela 1). Além disso,

apresentou um baixo teor de fósforo, teor médio de potássio, alta CTC, muito baixa saturação por bases, alta saturação por alumínio, dentre outras características. Este solo pode ser considerado um solo pobre em características de fertilidade, necessitando adubação para um melhor rendimento das culturas implantadas.

TABELA 1. Resultados da análise química do solo coletado no IRGA no ano de 2008. Laboratório de Análises – Departamento de Solos/UFRGS.

Argila %	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg.dm ⁻³	K mg.dm ⁻³	M.O. %	Al cmol.dm ⁻³
50	4,7	5,2	4,4	50	1,6	1,4
Ca cmol.dm ⁻³	Mg cmol.dm ⁻³	Al+H cmol.dm ⁻³	CTC cmol.dm ⁻³	% SAT BASES	%SAT Al	Relação Ca/Mg
1,0	0,6	10,9	12,7	14	44,4	1,7
Relação Ca/K	Relação Mg/K	S mg.dm ⁻³	Zn mg.dm ⁻³	Cu mg.dm ⁻³	B mg.dm ⁻³	Mn mg.dm ⁻³
8	4,7	21	0,9	0,4	0,2	12

A variabilidade genética foi estudada através de 105 genótipos de milho, distribuídos em diferentes tipos de variedades, híbridos, variedades de polinização aberta e variedades crioulas (Tabela 2).

3.1 Estudo 1: Seleção de genótipos de milho ao encharcamento do solo

Este experimento teve como finalidade a avaliação de germoplasma para o caráter tolerância ao encharcamento do solo, sendo realizado em outubro de 2008. A semeadura foi feita em potes de plástico com 8 cm de altura e 10 cm de diâmetro. Os potes foram furados na base para permitir a drenagem da água antes do encharcamento e a irrigação por capilaridade nos vasos submetidos à saturação do solo. Foram semeadas quatro sementes por pote, a uma profundidade de dois a três centímetros. Foi feito um desbaste em

torno de 15 dias após a emergência, restando duas plantas em cada pote, sendo este a parcela experimental.

TABELA 2. Relação empresas fornecedoras, tipos de variedades e genótipos de milho avaliados.

Empresa fornecedora	Tipo de milho	Genótipos
PIONEER SEMENTES	Híbrido	30B30, 30F36, 30F53, 30F80, 30P34, 32R48, P3232, P3063
SYNGENTA SEEDS	Híbrido	Cargo, Garra, Impacto, Maximus, Fórmula, Penta, Somma, Traktor, Master, Premium
AGROESTE	Híbrido	AS32, AS523, AS3466, AS1565
EPAGRI/SC	Variedade de polinização aberta	SC 003, SC 004, SC 006, SC 009, SC 011, SC 012, SC 013, SC 017, SC 018, SC 021, SC 050, SC 099, SC 100, SC 103, SC 104, SC 105, SC 107, SC 108, SC 110
FEPAGRO/RS	Variedade crioula	Brs Missões, Bico De Ouro, Amarelão Comum, Ferro, Cabo Roxo, Amarelão, Cateto Fe265, Cpact Sint 2000 Flint, Colonial(Sta Eulália), Dente De Cão, Cpact Sint 2000 Dent, Ca 4003, Palha Roxa, Tupi Laranja, Cpact 2004-9, Cerrito Velho, Caiano Roxo, Farináceo Amarelo, Açoriano Branco, Alta 25, Cpact 2004-11, Cepaf 2, Tupi Laranja, Saracura, Oito Carreiros, Brs Planalto, Roxo Índio, F35 Fundacep, Pampa, Al Alvorada, Al 30/40, Quarentino, Grand Roux Amarelo, Dente De Ouro, Fundacep 20033, Ajuricaba, Brasino, Vermelhão, Caiano Branco, Cpact 2004-04, Brancão, Fundacep 20032, Colonial Vermelho, Oito Carreiras Amarelo, Tupi Amarelo, CA 4002
FEPAGRO/RS	Variedade melhorada	RS 20, RS 21, RS 22, RS Pagnonceli
EMBRAPA	Variedade crioula	Oito Carreiras Branco, Bagualão, Branco C82, Caiano Rajado, Colonial (Sta Eulália), Cunha, Al Ipiranga, Al 25 Piratininga, Br 5202 Pampa, F34 (Fundacep), Fundacep 49, SCS 154 Fortuna, CA 4001

As plantas foram regadas diariamente até o momento do encharcamento. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado com três repetições. Os genótipos foram submetidos a dois níveis de alagamento do solo (solo saturado, com a lâmina de água em torno de cinco centímetros abaixo do nível do solo, e solo inundado, com a lâmina de água a

dois centímetros acima do solo) (Figura 1). O tratamento com solo saturado foi realizado dentro de bandejas de 16 L de capacidade com dimensões de 69x33x9 cm (comprimento x largura x altura), e o com solo inundado em bandejas de 45 L de capacidade com dimensões de 67x44x19 cm. A água destilada foi utilizada no encharcamento para evitar possíveis influências ou contaminações por elementos biológicos e minerais. O alagamento foi realizado quando as plantas estavam no estágio de desenvolvimento vegetativo V_3 (Ritchie & Hanway, 1989). Não foi feito nenhum tipo de adubação nas plantas e o controle de insetos e plantas daninhas foi feito manualmente. As cortinas da estufa eram abertas diariamente pela manhã e fechadas à tarde para que a temperatura ficasse mais próxima da do ambiente.

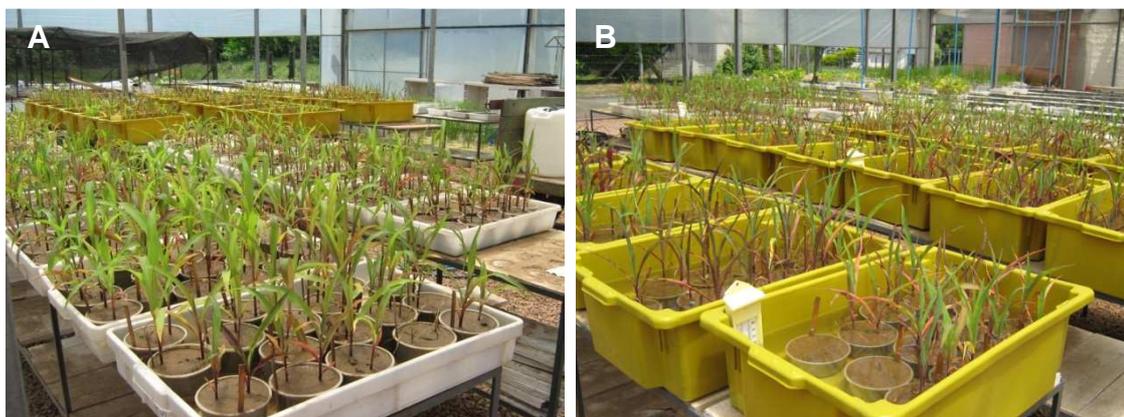


FIGURA 1. Experimento 1 da seleção de genótipos de milho ao encharcamento do solo. A) Solo saturado; B) Solo inundado. UFRGS, Faculdade de Agronomia, outubro de 2008.

A concentração de oxigênio no meio alagado foi avaliada por meio de oxímetro marca Digimed e modelo DM-4P; o pH por potenciômetro marca Digimed e a temperatura através de seis termômetros de máxima e mínima espalhados pelo experimento dentro das bandejas. Antes do início das medições, o oxímetro e o potenciômetro foram calibrados conforme normas do

fabricante. Para a medição da concentração de oxigênio, o aparelho era ligado e ficava 12 minutos em espera para auto-estabilização e então ficava pronto para medição. Cada medição durou em torno de cinco minutos. Tanto o pH quanto a concentração de oxigênio foi medida dentro de cada pote contendo solo. A medição feita dentro dos potes foi possível devido a um tubo permeável instalado na vertical no centro do pote, o que permitia o acesso à solução do solo (Figura 2). Alguns potes continham plantas semeadas (tratamento com planta) e outros apenas o solo (tratamento sem planta) para verificar a influência das plantas na concentração de oxigênio e no pH do meio. As medições foram feitas diariamente, desde o início do encharcamento até o último dia do experimento, totalizando 15 dias no primeiro e oito dias no segundo experimento. As notas foram atribuídas aos genótipos no final do experimento de acordo com o nível de estresse de cada planta. A escala de notas utilizada foi de um a três, com variação de 0,5. Assim, foram utilizadas cinco notas (1; 1,5; 2; 2,5 e 3). As plantas que se mantinham mais saudáveis, mais verdes, com o fenótipo mais próximo de uma planta que não sofreu o estresse (testemunha) recebiam nota um. Essa nota aumentava conforme as plantas se apresentavam mais debilitadas, com senescência de folhas e perda de clorofila, chegando ao máximo de nota três (Figura 3).

Os dados de concentração de oxigênio e pH foram submetidos à análise de variância e, em caso de significância dos efeitos simples ou interações pelo teste F, foi realizada a análise complementar das médias dos tratamentos pelo teste de Tukey com 5% de probabilidade do erro experimental, pelo *software* SAS (SAS, 1989).



FIGURA 2. Bandeja com encharcamento em solo inundado, mostrando a presença dos tubos para medição da concentração de oxigênio e pH, e os aparelhos medidores (oxímetro e potenciômetro).

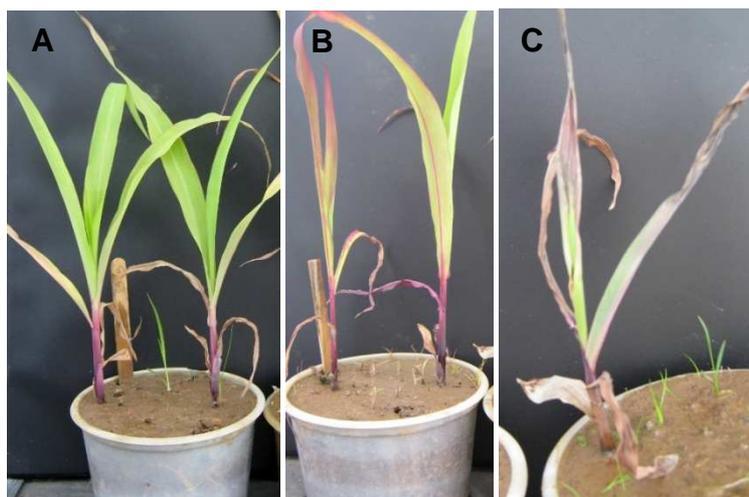


FIGURA 3. Plantas demonstrando a escala de notas utilizada. A) Nota 1; B) Nota 2; C) Nota 3.

Este experimento foi repetido em fevereiro de 2009, tendo por objetivo verificar a influência das condições de ambiente do meio nos resultados anteriormente obtidos. Os tratamentos e procedimentos foram exatamente iguais em ambas as épocas de avaliação.

3.2 Estudo 2: Concentração de nutrientes em genótipos contrastantes

3.2.1 Experimento 1

Este experimento foi conduzido em junho de 2009, em outra estufa do Departamento de Plantas de Lavoura da UFRGS. Essa estufa era menor e de vidro, possibilitando a manutenção de uma maior temperatura ambiente na época do ano avaliada. Neste experimento foram utilizados seis genótipos de milho, três genótipos classificados como tolerantes (Fórmula, Açoriano Branco e Caiano Branco) e três sensíveis (30B30, 30F36 e Somma). Somente o nível de alagamento com o solo inundado foi empregado. A finalidade deste experimento era observar a possível absorção diferencial de nutrientes pelos genótipos contrastantes. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado. O experimento contou com três repetições sob inundação mais uma testemunha sem alagar. A parcela experimental, como nos trabalhos anteriores, era um pote de dimensões já mencionadas com duas plantas. O experimento durou 16 dias, e terminava quando a maioria das plantas se encontrava debilitada, frágil e com as folhas secas. Ao final do experimento a parte aérea das plantas foi coletada, ensacada em sacos de papel e levada ao Laboratório de Análise de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, onde foi feita a análise de tecido para macro (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre) e micronutrientes (boro, ferro, manganês, sódio, cobre e zinco).

Os dados obtidos da análise de tecidos também foram submetidos à análise de variância e separação de médias pelo teste de Tukey.

3.2.2 Experimento 2

Este experimento foi realizado em março de 2010, na mesma estufa onde foram realizados os dois primeiros experimentos. Foram analisados somente dois genótipos (Fórmula e 30F36), sendo um considerado tolerante e outro sensível ao encharcamento do solo, respectivamente. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado com quatro repetições. Neste experimento, foram adicionados aeradores nas bandejas, além de uma solução contendo nitrogênio na forma de sulfato de amônio $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ na concentração de 1 mol.L^{-1} (Figura 4). Os aeradores foram utilizados para verificar a influência do oxigênio na absorção ou toxicidade dos nutrientes absorvidos pelas plantas. O nitrogênio foi acrescentado no meio com a finalidade de analisar a influência deste nutriente na forma de amônio na absorção de outros elementos, conforme estudo realizado por Thomas e Sodek (2005).

Os tratamentos avaliados foram: solução com nitrogênio e com aeração, com nitrogênio e sem aeração, sem nitrogênio e com aeração e sem nitrogênio e sem aeração. Foi avaliada somente a concentração de oxigênio no meio alagado, conforme descrito anteriormente. A análise de tecido feita pelo Laboratório de Análise de Solo da UFRGS e também uma análise de nitrogênio no meio alagado, nas formas de nitrato e amônio, por destilação e titulação (Tedesco *et al.*, 1995).

A análise estatística dos resultados foi realizada conforme descrito anteriormente.



FIGURA 4. Experimento 2 da concentração de nutrientes em genótipos contrastantes. UFRGS, Faculdade de Agronomia, junho de 2009.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estudo 1: Seleção de genótipos de milho tolerantes ao encharcamento do solo

O milho apresenta variabilidade genética para tolerância ao encharcamento do solo (Lemkekeyes & Sachs, 1989; Sachs *et al.*, 1996; Silva *et al.*, 2007). No presente trabalho foram avaliados 105 genótipos, sendo 22 híbridos, 19 variedades de polinização aberta, 59 variedades crioulas e quatro variedades melhoradas pela FEPAGRO. A variabilidade genética dos genótipos em relação à tolerância ao encharcamento do solo foi avaliada pela condução de um experimento utilizando dois níveis de encharcamento do solo, um mais brando (solo saturado) e outro mais severo (solo inundado). Primeiramente, acreditava-se que as plantas não suportariam o nível mais drástico de encharcamento testado. Entretanto, esse foi o tratamento que mais diferenciou os genótipos, separando-os em classes distintas, diferente do tratamento com solo saturado, em que as plantas tenderam a se igualar no comportamento. Na atribuição de notas, houve uma distribuição dos genótipos entre as classes tolerante, intermediário e sensível, com alguns genótipos se destacando (Tabela 3).

TABELA 3. Número de genótipos encontrados em cada classe, nos dois níveis de encharcamento do solo (solo saturado e solo inundado). UFRGS, outubro de 2008 e fevereiro de 2009.

Classe	Outubro		Fevereiro	
	Saturado	Inundado	Saturado	Inundado
Tolerante	07	02	05	-
Intermediário	79	83	94	24
Sensível	19	20	06	81

Os genótipos foram avaliados no estágio V₃ (Ritchie & Hanway, 1989), baseado em um estudo realizado por Zaidi et al. (2004). Neste trabalho, os autores afirmaram que o dano devido ao excesso de umidade no solo poderia variar significativamente com o estágio de desenvolvimento da planta, sendo os genótipos mais suscetíveis na fase de plântula, seguidos do estágio de pendoamento. Desta forma, o estresse submetido nos estádios iniciais de desenvolvimento pode prever um desempenho tolerante da planta sob estresse nos estádios subseqüentes.

A variabilidade genética entre o germoplasma testado foi elevada, uma vez que os genótipos eram provenientes de diferentes locais e empresas produtoras de sementes. Desta forma, era esperado que dentre todos eles algum ou alguns se sobressaíssem em relação à tolerância. Um dos genótipos que mais se destacou foi um híbrido (Fórmula) liberado para os agricultores recentemente. Informações sobre o germoplasma desse híbrido não são públicas. Duas variedades crioulas (Açoriano Branco e Caiano Branco) também mereceram destaque por apresentarem um alto grau de tolerância dentre os genótipos testados. Variedades crioulas são importantes fontes de germoplasma para o melhoramento de milho (Pressoir & Berthaud, 2004). Entretanto, um dos principais fatores limitantes do uso dessas variedades em programas de melhoramento é o receio de que a variabilidade genética em vez

de melhorar caracteres específicos possa contribuir para piorar a média de caracteres agronômicos importantes já fixados nas variedades comerciais, tais como precocidade, estatura de planta e rendimento de grãos (Wietholter *et al.*, 2008).

Um aspecto importante na avaliação da tolerância ao encharcamento observado neste estudo foi a temperatura ambiente. A primeira avaliação de genótipos foi realizada durante o mês de outubro, com temperaturas variando de 10 a 45°C. Wang *et al.* (2009) indicaram que temperaturas mais elevadas poderiam causar um dano maior para genótipos de grama-azul (*bluegrass*) em condições de encharcamento de solo. Assim sendo, o mesmo experimento foi repetido em fevereiro com temperaturas mais elevadas, variando de 16 a 48°C. De maneira geral, os genótipos se comportaram de uma maneira mais semelhante na época outubro (temperaturas mais amenas).

Em relação ao nível de água, não houve diferença entre os genótipos quando o solo foi saturado. Quando conduzido em fevereiro, houve uma maior diferenciação dos genótipos, fato também observado no nível mais drástico de alagamento do solo (solo inundado). No entanto, alguns genótipos se destacaram nas duas épocas de avaliação, entre eles o genótipo Fórmula, que mereceu destaque por ser tolerante em quase todos os tratamentos, com exceção do nível inundado na época fevereiro, a qual não evidenciou nenhum genótipo tolerante (Tabela 3). Os genótipos sensíveis foram observados em maior número nas condições avaliadas no presente estudo, sendo que 30B30, 30F36 e Somma revelaram sempre sensibilidade alta nos ambientes avaliados. A média das notas na primeira época de condução do experimento e no nível de solo saturado foi de 1,96, variando de 1 a 3, já no solo inundado foi de 1,99,

também variando de 1 a 3. Na segunda época, o nível saturado do solo obteve média de notas de 1,82, variando de 1 a 3, e o nível de solo inundado obteve média de 2,71, variando de 2 a 3.

Também foram avaliadas as linhagens contrastantes R2 - CT954330 (tolerante) e S5 - CT966200 (sensível) cedidas pela Embrapa, as quais não demonstraram uma diferença visual marcante. Silva *et al.* (2006), avaliando as mesmas linhagens, observaram valores significativamente maiores para os caracteres matéria seca de raiz e de parte aérea na linhagem R2, considerada como tolerante. A não observação de diferenças entre as linhagens no presente estudo deve-se, provavelmente, ao fato de o método de encharcamento utilizado neste trabalho ser diferente daquele empregado por Silva *et al.* (2006). Em sua análise, os referidos autores avaliaram as linhagens em outro tipo de solo, não classificado, no período de julho a setembro, com temperaturas mínimas de 25°C. A semeadura foi feita em copos plásticos, com 10,5 cm de altura e 200 ml de capacidade, e foi colocada uma lâmina de água de 4 cm, ficando abaixo da metade do copo, na maioria do período de condução do experimento, aumentando para 12 cm por duas vezes durante quatro dias. Além disto, no presente trabalho os genótipos foram avaliados com a atribuição de uma nota visual, devido ao fato de os genótipos apresentarem grande divergência genética, diferente de Silva *et al.* (2006), que analisaram somente linhagens. A ampla divergência observada nos genótipos avaliados neste estudo impossibilita a distinção dos mesmos por métodos quantitativos, pois há uma diferenciação em relação ao comportamento dos genótipos em aspectos como heterose, vigor inicial, temperatura base, tamanho da semente entre outros.

4.2 Efeito da temperatura sobre o estresse provocado pelo encharcamento do solo

A tolerância ao encharcamento do solo é um caráter de avaliação complexa em condições de campo. É difícil controlar as variações do ambiente e fazer com que somente o encharcamento do solo *per se* aconteça. Variações ambientais relacionadas à temperatura (Wang *et al.*, 2009), salinidade (Barrett-Lennard, 2003; Colmer & Greenway, 2011) e fertilidade do solo (Ranno *et al.*, 2007), por exemplo, podem influenciar de maneira significativa o comportamento dos genótipos quando submetidos ao estresse por encharcamento do solo.

No presente trabalho, houve uma forte influência da temperatura na manifestação do caráter tolerância ao encharcamento do solo. Diversos trabalhos vêm sendo realizados para estabelecer critérios de avaliação desse caráter em diferentes espécies vegetais. Os resultados obtidos dependem fortemente da profundidade e duração da submergência, idade da planta e temperatura da água (Agarwal & Grover, 2006). A concentração de oxigênio é rapidamente reduzida quando um solo é alagado e a razão dessa redução é maior quando a temperatura do solo aumenta (Drew, 1997). Em um estudo feito com grama-azul, Wang *et al.* (2009) verificaram que o encharcamento induzido com altas temperaturas tinha efeitos mais severos no crescimento das folhas e nos carboidratos solúveis da raiz em comparação ao realizado em temperaturas amenas, o que poderia estar associado com um rápido declínio nas funções normais da raiz em solos úmidos e quentes.

Desta forma, um experimento para analisar estes efeitos foi estabelecido. A análise de variância indicou que os efeitos do nível de água, dia e a presença ou não de plantas no meio, assim como suas interações foram significativas para a concentração de oxigênio e o pH da solução do solo (Tabela 4).

TABELA 4. Resumo da análise de variância para os caracteres oxigênio e pH nas duas épocas de condução do experimento.

Causas de Variação	GL	Oxigênio	pH
Época	1	123,17 **	6,29 **
Dia (Época)	22	32,45 **	0,89 **
Nível Água (Época)	2	6,32 *	0,81 **
Planta (Época)	2	73,03 **	5,03 **
Dia*Nível Água (Época)	22	4,02 **	0,15 **
Dia*Planta (Época)	22	4,39 **	0,09 *
Nível Água*Planta (Época)	2	7,60 **	0,85 **
Dia*Nível Água*Planta (Época)	22	3,88 **	0,05

*Significativo a 5%; **Significativo a 1%.

A concentração média de oxigênio na primeira época de avaliação (Outubro) foi de 3,10 mg.L⁻¹, sendo que na segunda época (Fevereiro) o valor foi quase a metade (1,68 mg.L⁻¹). Provavelmente, a temperatura mais alta no verão levou a uma maior taxa de respiração e a uma consequente elevação no consumo de oxigênio pelas plantas e micro-organismos do solo. Sousa (2003), analisando os níveis de oxigênio em soja, encontrou valores de 0,4 mg.L⁻¹ de oxigênio após oito horas de hipoxia. Thomas & Sodek (2006), em um estudo feito também com soja em ambiente alagado, encontraram níveis de concentração de oxigênio de 0,7 mg.L⁻¹ no primeiro dia de experimento, chegando a 0,4 mg.L⁻¹ no quinto dia. No presente estudo, foram encontradas concentrações de oxigênio de até 0,27 mg.L⁻¹ no 16º dia em outubro e de 0,21 mg.L⁻¹ no oitavo dia em fevereiro.

Em solos alagados, a correção da acidez acontece naturalmente como consequência do processo químico de redução do solo. A partir desta e de outras reações de redução que ocorrem no solo alagado, modificam-se os valores do pH e aumenta a disponibilidade de alguns elementos como ferro e manganês (Ponnamperuma, 1983). No presente experimento, o pH era de 4,7 em solo seco e aumentou quando o solo foi alagado. Da mesma forma, houve variação conforme a época do experimento, sendo que a média para outubro foi de 5,49 e a de fevereiro foi de 5,82.

A presença de plantas nos vasos influenciou nos níveis de oxigênio e pH na solução do solo. Tanto para outubro, quanto para fevereiro, houve uma maior concentração de oxigênio na presença de plantas nos vasos (Tabela 5), o contrário do que se esperaria, já que as raízes das plantas e os micro-organismos presentes no solo alagado consomem quase que a totalidade do oxigênio disponível (Ponnamperuma, 1983). O nível de água, por sua vez, só influenciou na concentração de oxigênio na época de fevereiro, não diferenciando na época de outubro. A época de fevereiro foi marcada por temperaturas elevadas. Sousa *et al.* (2010) afirmaram que temperaturas entre 30 e 35°C intensificam a atividade dos micro-organismos, aumentando o consumo de oxigênio e favorecendo o decréscimo do potencial redox do solo.

O maior nível de oxigênio obtido em outubro foi no tratamento com planta e com solo saturado, sendo diferente do tratamento com solo inundado (Tabela 5). Na ausência de plantas, nesta mesma época, não houve diferença na concentração de oxigênio nos dois níveis de alagamento do solo. Já na época fevereiro, houve diferença na concentração de oxigênio na ausência de plantas em relação aos níveis de alagamento empregados, o que não

aconteceu na presença de plantas. O pH mais elevado foi obtido na época fevereiro, na ausência de plantas no meio e com o solo inundado, sendo diferente dos demais tratamentos (Tabela 5). Na época outubro, o pH mais elevado foi obtido na mesma situação de fevereiro, porém foi menor que esta época. O solo inundado, por apresentar uma lâmina de água maior, tem mais efeitos de redução quando comparado com o solo saturado, o que aumenta o pH da solução do solo (Kozłowski, 1997). Com o alagamento do solo, o ambiente químico e biológico é profundamente alterado em relação ao anteriormente oxidado. Nessa condição, após consumo do oxigênio molecular, micro-organismos anaeróbios passam a utilizar compostos oxidados do solo, inclusive os minerais, como receptores de elétrons (Ranno *et al.*, 2007).

TABELA 5. Médias de concentração de oxigênio e pH na interação entre nível de água e a presença ou ausência de plantas do meio analisado, nas duas épocas de condução do experimento.

Plantas	Nível Água											
	Saturado		Inundado		Média	Saturado		Inundado		Média		
	Outubro		Fevereiro			Fevereiro		Fevereiro				
Oxigênio (mg.L ⁻¹)												
Ausência	2,05	c ¹	2,45	c	2,25	B	1,99	a	1,02	b	1,51	B
Presença	4,33	a	3,64	b	3,99	A	2,28	a	1,82	a	2,05	A
Média	3,19	A	3,05	A			2,14	A	1,42	B		
pH												
Ausência	5,56	b	5,85	a	5,71	A	5,78	b	6,12	a	5,95	A
Presença	5,29	c	5,28	c	5,28	B	5,70	b	5,70	b	5,70	B
Média	5,42	B	5,57	A			5,74	B	5,91	A		

¹ Médias seguidas da mesma letra minúscula para efeitos de interação, e seguidas da mesma letra maiúscula para cada média, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade do erro experimental.

O experimento de outubro teve a duração de 16 dias, ocasião em que as plantas se encontravam debilitadas devido ao estresse (Figura 5 A e B). Quando realizado em fevereiro por sua vez, teve duração de oito dias, metade do tempo da época anterior (Figura 5 C e D), o que foi ocasionado

provavelmente pela temperatura extremamente elevada durante o dia. Este fato sugere que a temperatura tem uma influência negativa na sobrevivência das plantas submetidas ao estresse por encharcamento do solo.



FIGURA 5. Genótipos de milho submetidos à condição de estresse hídrico nas duas épocas de condução do experimento e nos dois níveis de alagamento do solo: A) solo saturado, época outubro; B) solo inundado, época outubro; C) solo saturado, época fevereiro; D) solo inundado, época fevereiro.

Segundo Wang (2009), altas temperaturas aumentam a demanda da planta por oxigênio e o aumento da respiração sob altas temperaturas e reduzida disponibilidade de oxigênio em solos saturados pode causar danos severos às plantas, mesmo num curto período de estresse. Huang *et al.* (1998), analisando um tipo de gramínea (*turfgrass*), encontraram reduções maiores na

fotossíntese, concentração de clorofila e viabilidade da raiz quando uma reduzida aeração do solo era combinada com temperatura elevadas.

Com o passar dos dias, os níveis de oxigênio e pH do meio foram sendo modificados, sendo que a tendência foi do nível de oxigênio cair e o pH aumentar (Figuras 6 e 7, respectivamente). A análise de regressão mostrou-se linear na maioria das situações, sendo quadrática em apenas três casos. A concentração de oxigênio diminuiu, em média, $0,34 \text{ mg.L}^{-1}$ por dia em outubro e $0,43 \text{ mg.L}^{-1}$ em fevereiro. Essa maior redução em fevereiro pode explicar a duração menor do experimento conduzido nessa época, corroborando com outros trabalhos que atribuem maior consumo de oxigênio sob alagamento em associação com altas temperaturas (Huang *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2009).

O pH aumentou em média $0,02$ unidades por dia em outubro e $0,17$ em fevereiro. Pode-se constatar também que a temperatura, além de influenciar na concentração de oxigênio, causou uma elevação nos níveis de pH em uma taxa mais rápida, neutralizando mais rapidamente o meio. Segundo Sousa *et al.* (2010), o alagamento eleva o pH do meio até próximo à neutralidade. Assim sendo, o pH de solos ácidos tende a subir e o pH de solos básicos tende a cair nesses ambientes.

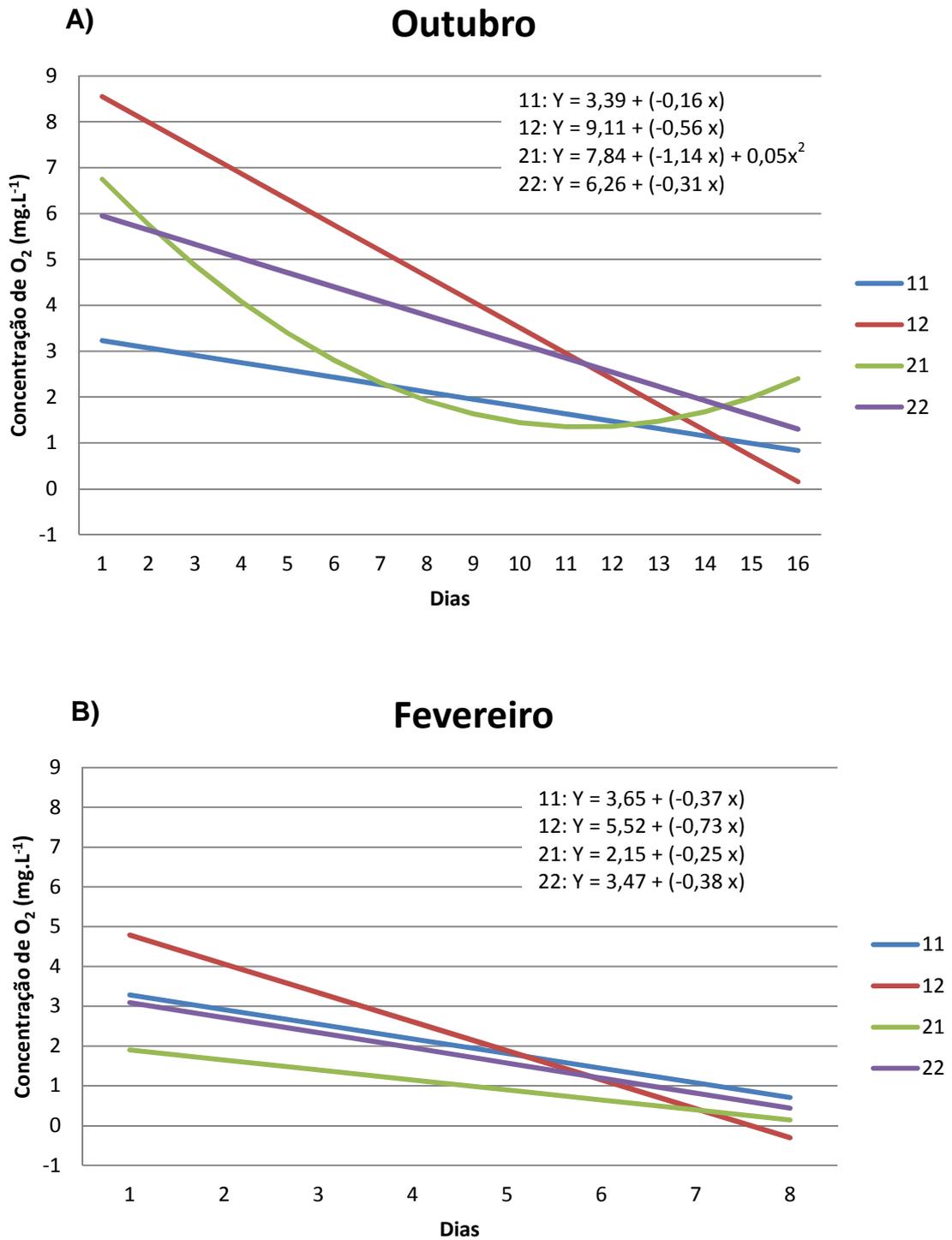


FIGURA 6. Análise de regressão para os níveis de oxigênio em função dos dias de alagamento nas épocas outubro de 2008 (A) e fevereiro de 2009 (B). 11) solo saturado, sem plantas; 12) solo saturado, com plantas; 21) solo inundado, sem plantas; 22) solo inundado, com plantas.

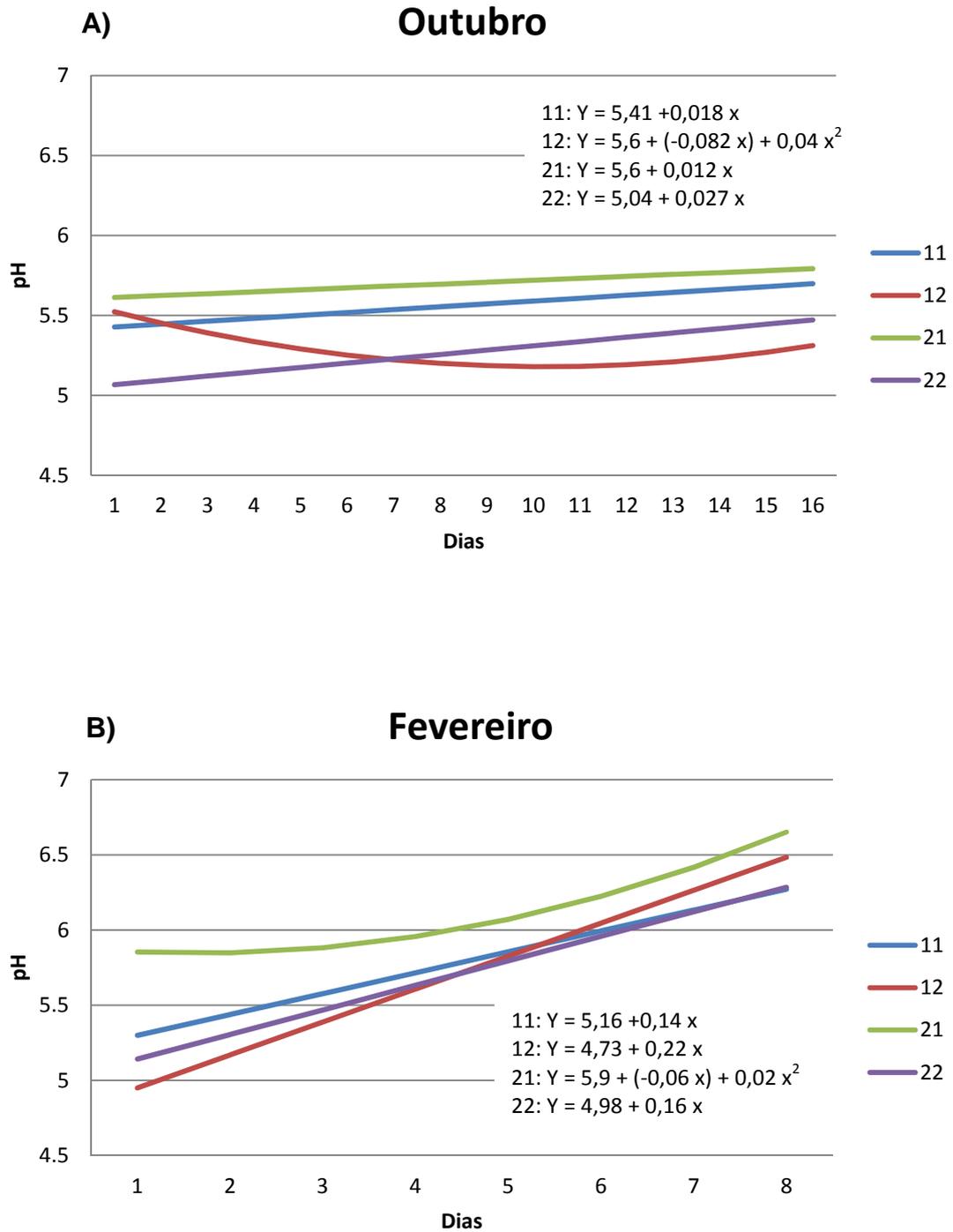


FIGURA 7. Análise de regressão para os níveis de pH em função dos dias de alagamento nas épocas outubro de 2008 e fevereiro de 2009: 11) solo saturado, sem plantas; 12) solo saturado, com plantas; 21) solo inundado, sem plantas; 22) solo inundado, com plantas.

De maneira geral, o alagamento do solo causou a redução drástica no nível de oxigênio e a elevação do pH, especialmente quando a temperatura foi mais elevada. Dependendo dos objetivos da análise, o experimento pode ser realizado em ambientes mais quentes ou mais frios. Quando conduzido em temperaturas mais elevadas, há uma maior diferenciação dos genótipos, sendo possível identificar mais claramente as plantas tolerantes e sensíveis. Em temperaturas mais amenas, há uma resposta mais modulada, os genótipos se comportam de maneira mais semelhante. Sendo assim, quando o experimento for conduzido no inverno, é importante aumentar o nível de água do solo, para compensar a baixa temperatura e separar melhor os genótipos.

4.3 Estudo 2: Concentração de nutrientes em genótipos contrastantes

De acordo com o desempenho no primeiro experimento, os genótipos Fórmula, Açoriano Branco e Caiano Branco foram escolhidos como representantes tolerantes ao encharcamento de solo e os genótipos 30B30, 30F36 e Somma como sensíveis. Assim sendo, nos experimentos subsequentes esses genótipos foram analisados para o ajustamento de outras variáveis ambientais. Da mesma forma, esses experimentos foram realizados com o mesmo solo e com o nível de alagamento mais drástico, o solo inundado, por separar melhor os genótipos. Este experimento foi conduzido com o objetivo de verificar a absorção diferencial de nutrientes por parte de genótipos tolerantes e sensíveis, quando submetidos ao estresse por excesso hídrico, e foi realizado em casa de vegetação, no mês de junho, com temperatura média mínima de 10,5°C e máxima de 38°C .

Os resultados indicaram diferença entre os genótipos na absorção dos elementos fósforo, potássio, magnésio, boro, ferro e zinco (Tabela 6). Na comparação de solo seco com solo inundado, a diferença foi significativa para a absorção dos elementos nitrogênio, fósforo, potássio, boro e ferro, sendo que houve interação significativa apenas para o elemento boro. O alagamento do solo determinou a elevação drástica na concentração de ferro, e a diminuição nos demais elementos (nitrogênio, fósforo, potássio e boro). Board (2008) analisando soja sob alagamento encontrou uma diminuição nos níveis de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, manganês e zinco. O autor afirma que o nitrogênio, em especial, tem uma grande importância na perda de rendimento de grãos ocasionada pelo alagamento em soja. Do contrário, Drew (1997) atribui um aumento nos níveis de fósforo, potássio, cobre e ferro com a hipoxia, mas um decréscimo na biodisponibilidade de nitrogênio, enxofre e zinco no crescimento das plantas.

TABELA 6. Resumo da análise de variância para a concentração dos elementos nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, ferro, manganês, sódio, cobre e zinco. UFRGS, junho de 2009.

Variáveis	Genótipo	Solo	Genótipo X Solo	CV%
Quadrado Médio.....			
Nitrogênio	0,05 ^{NS}	0,18 [*]	0,04 ^{NS}	13,7
Fósforo	0,0002 ^{**}	0,0003 ^{**}	0,00001 ^{NS}	5,8
Potássio	0,074 ^{**}	0,108 ^{**}	0,012 ^{NS}	8,6
Cálcio	0,006 ^{NS}	0,0003 ^{NS}	0,006 ^{NS}	11,4
Magnésio	0,017 [*]	0,012 ^{NS}	0,007 ^{NS}	12,6
Enxofre	0,0003 ^{NS}	0,0002 ^{NS}	0,0001 ^{NS}	13,2
Boro	7,11 [*]	30,68 ^{**}	10,18 [*]	11,5
Ferro	8753 [*]	191065 ^{**}	6198 ^{NS}	21,9
Manganês	2289 ^{NS}	684 ^{NS}	1443 ^{NS}	17,8
Sódio	10436 ^{NS}	2544 ^{NS}	1137 ^{NS}	50,8
Cobre	0,158 ^{NS}	0,125 ^{NS}	0,158 ^{NS}	16,3
Zinco	113,02 [*]	21,12 ^{NS}	33,82 ^{NS}	14,4

*Significativo a 5%; **Significativo a 1%; NS=Não Significativo

O aumento nos níveis de ferro no solo ocasionado pelo alagamento foi em torno de 330%, passando de 88 mg.kg⁻¹ para 295 mg.kg⁻¹. Setter *et al.* (2009) encontraram valores de quatro a seis vezes maior nos níveis de ferro nas plantas alagadas em comparação com as não alagadas. Os micro-organismos anaeróbios utilizam os compostos oxidados do solo como receptores de elétrons no seu metabolismo, obedecendo a uma sequência, em função da afinidade dos compostos em receber elétrons, sendo que o primeiro elemento a ser utilizado é o nitrato, seguido de óxidos de manganês, óxidos de ferro e por último sulfatos (Sousa *et al.*, 2010). Assim, há um aumento nos teores de ferro na solução do solo devido à sua redução, passando de óxido férrico (Fe⁺³) à óxido ferroso (Fe⁺²), com consequente aumento na solubilidade deste elemento (Sousa *et al.*, 2010).

O fósforo foi ligeiramente mais absorvido pelos genótipos tolerantes (Tabela 7). Este elemento não está diretamente envolvido nas reações de oxidação e redução em solos alagados, mas devido a sua reatividade com os compostos que são passíveis de redução, seu comportamento é profundamente afetado pelo alagamento (Sousa *et al.*, 2010).

TABELA 7. Concentração dos nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), em % (m/m), encontrados nos tecidos (parte aérea) dos genótipos submetidos ao alagamento do solo.

Genótipo	N	P	K	Ca	Mg	S
Fórmula	1,10 ^{NS}	0,106 a ¹	1,06 b	0,62 ^{NS}	0,53 a	0,11 ^{NS}
Açoriano Branco	1,03	0,086 b	1,36 a	0,49	0,38 b	0,09
Caiano Branco	1,33	0,101 a	0,98 b	0,57	0,55 a	0,11
30B30	1,27	0,085 b	1,33 a	0,54	0,57 a	0,12
30F36	1,31	0,086 b	1,12 b	0,56	0,59 a	0,11
Somma	1,36	0,086 b	1,06 b	0,60	0,55 a	0,11

¹ Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade do erro experimental. NS = Não Significativo

Não houve uma diferenciação clara entre genótipos tolerantes e sensíveis na absorção dos micronutrientes (Tabela 8). Diversos autores já observaram um aumento nos teores de ferro na planta quando submetida ao encharcamento do solo (Ponnamperuma, 1983; Drew, 1997; Kozłowski, 1997; Setter *et al.*, 2009). Em plantas, o estoque de ferro é realizado pela ferritina, uma classe de proteínas multiméricas localizada no cloroplasto, apta a armazenar centenas de átomos de ferro dentro de sua cavidade central (Motta *et al.*, 2001). A ferritina é controlada pelo desenvolvimento da planta e, em folhas maduras, é induzida por uma sobrecarga de ferro na ordem de 40 a 50 vezes. A diferença entre uma planta tolerante e uma sensível ao encharcamento do solo pode estar na capacidade da ferritina em armazenar ou estocar quantidades grandes de ferro em um menor período de tempo, não permitindo que ocorra a toxicidade.

TABELA 8. Concentração dos nutrientes boro (B), ferro (Fe), manganês (Mn), sódio (Na), cobre (Cu) e zinco (Zn), em mg.kg^{-1} , encontrados nos tecidos dos genótipos submetidos ao alagamento do solo.

Genótipo	B		Fe		Mn	Na	Cu	Zn	
Fórmula	15,00	a ¹	243,2	ab	204 ^{NS}	99 ^{NS}	2,5 ^{NS}	41,16	abc
Açoriano Branco	12,33	bc	115,3	c	148	100	2,0	32,50	c
Caiano Branco	14,33	ab	153,2	bc	224	114	1,8	34,66	bc
30B30	13,50	a	210,7	ab	222	238	2,1	44,00	ab
30F36	12,16	bc	254,2	a	209	69	2,0	36,50	bc
Somma	10,83	c	172,7	abc	202	128	2,0	48,66	a

¹ Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade do erro experimental. NS = Não Significativo

Não foi observada uma diferença significativa na absorção de sódio pelas plantas provavelmente devido ao alto coeficiente de variação da análise (50,8%). Entretanto, outros autores já atribuíram um aumento nos níveis deste nutriente e também nos níveis de cloreto (Cl⁻) em condições de alagamento,

principalmente em regiões salinas (Barrett-Lennard, 2003; Colmer & Greenway, 2011). As análises do tecido das plantas não incluíram a determinação de cloro. Barret-Lennard (2003) atribui que o aumento nas concentrações de sódio e cloreto no caule das plantas submetidas ao encharcamento do solo pode ser explicado devido ao decréscimo nas taxas de crescimento da parte aérea nesse tipo de ambiente. As concentrações que tornam o sódio tóxico às células ou às plantas não são bem definidas (Munns & Tester, 2008). Entretanto, a tolerância de uma planta a este nutriente em excesso pode estar associada a um eficiente sistema de excreção, ou a um aumento no tamanho da célula devido a um aumento no volume do vacúolo (Munns & Tester, 2008). Colmer & Greenway (2011) afirmam que um fator chave que limita a tolerância ao encharcamento do solo em culturas de sequeiro como trigo, cevada e milho é o mau funcionamento das raízes, principalmente no que diz respeito à absorção e ao transporte de íons. Ainda, Barret-Lennard (2003) sugere que o alagamento (hipoxia) afeta a seletividade da membrana e o transporte de nutrientes.

Após a análise de tecido realizada e verificada a absorção diferencial de nutrientes pelos genótipos, permaneceu a questão da influência do oxigênio sobre a absorção dos nutrientes pelas plantas, o que poderia acarretar na diminuição da toxicidade causada por alguns elementos presentes em quantidades elevadas. Assim sendo, o próximo experimento foi realizado com a colocação de aeradores no meio, ou na solução do solo, para ver a influência do oxigênio na absorção e toxicidade dos nutrientes às plantas. Também foi acrescentado nitrogênio na solução do solo, para verificar a influência deste elemento na absorção de outros nutrientes.

A presença de aeradores no meio diferenciou os níveis de amônio e nitrato na solução do solo na análise feita para este experimento (Tabela 9). Já a presença de nitrogênio só influenciou nos níveis de amônio da solução do solo. A análise de tecido mostrou que os genótipos absorvem de maneira diferente os nutrientes ferro e sódio, sendo que a presença de aeradores também influenciou o comportamento dos mesmos (Tabela 9). Já a presença de nitrogênio no meio foi importante somente na absorção de ferro, não influenciando a absorção de sódio pelas plantas.

TABELA 9. Resumo da análise de variância para os caracteres amônio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) e oxigênio (O_2) na solução do solo e ferro (Fe) e sódio (Na) no tecido das plantas.

CV	GL	NH_4	NO_3	O_2	Fe	Na
Aeração (A)	1	197 **	129,77 **	0,84	67344 **	286524 **
Dia (D)	7	-	-	4,39 **	-	-
Genótipo (G)	1	-	-	-	164738 **	143380 **
Nitrogênio (N)	1	9840 **	10,03	0,001	33540 *	24310
D*A	7	-	-	0,28	-	-
G*A	1	-	-	-	1176	81608 *
A*N	1	105 *	3,64	0,002	20910	27378
D*N	7	-	-	0,12	-	-
G*N	1	-	-	-	131328 **	41328
G*A*N	1	-	-	-	7080	28084
D*A*N	7	-	-	0,12	-	-

*Significativo a 5%; **Significativo a 1%; NS=Não Significativo

Em relação ao nível de oxigênio na solução do solo, este não sofreu influência dos aeradores nem da adição de nitrogênio no meio, somente se comportou de maneira diferente no decorrer dos dias (Figura 8). Os níveis de oxigênio no solo caíram drasticamente nas primeiras 24 horas de inundação. A camada de água superficial dificulta a entrada de oxigênio do ar no solo. Em poucas horas os micro-organismos aeróbios consomem todo o oxigênio que há no ar do solo ou dissolvido na solução, sendo que geralmente após 24 horas

de alagamento, todo o oxigênio é consumido na camada reduzida do solo (Camargo & Tedesco, 2004).

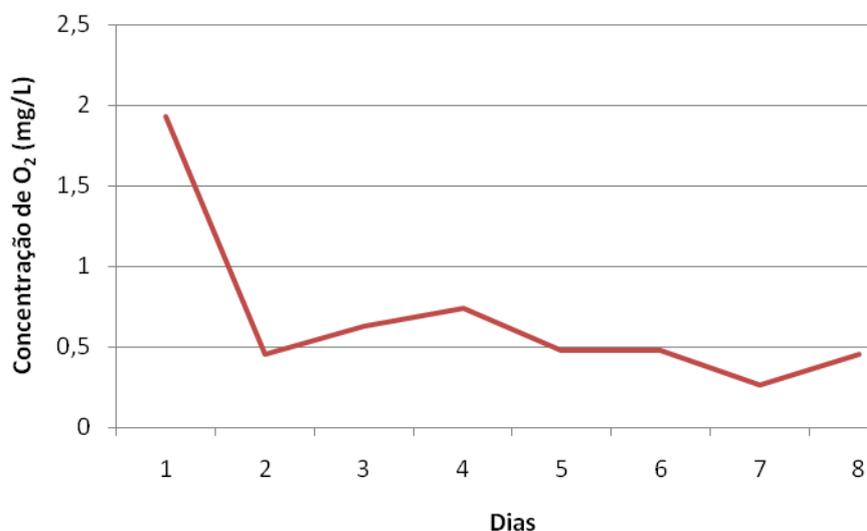


FIGURA 8. Concentração de oxigênio (mg.L^{-1}) durante os oito dias de avaliação do experimento. UFRGS, março de 2010.

Os níveis de nitrato e amônio na solução do solo foram diferenciados pela análise, e variaram conforme a adição de nitrogênio e aeradores no meio (Tabela 10). Os níveis tanto de nitrato quanto de amônio foram maiores na presença de aeradores e na adição de nitrogênio no meio. Entretanto, o nível de amônio foi quase oito vezes maior nesta mesma condição, o que era esperado devido a forma de nitrogênio adicionada ao solo conter amônio na fórmula ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). Entretanto, em solos alagados ocorre um acúmulo de amônio, pois a ausência de oxigênio interrompe a nitrificação do nitrogênio na forma amoniacal (Sousa *et al.*, 2010). Foi escolhida a adição de amônio como forma de nitrogênio neste trabalho devido a alguns estudos que afirmam que o amônio causaria uma despolarização de membranas, desregulando a absorção de alguns nutrientes. Mak *et al.* (2006) indicaram que elevadas concentrações de amônio no solo causaram uma substancial despolarização e aumento na

condutância das células. Este fato sugere que a presença de amônio poderia influenciar na absorção de alguns nutrientes, causando toxicidade às plantas.

TABELA 10. Médias dos níveis de amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), avaliados na solução do solo inundado, na interação entre adição de aeração e de nitrogênio no meio. UFRGS, março de 2010.

Nitrogênio	Aerado		Não Aerado		Média
	Amônio (mg.L^{-1})				
Com N	57,73	a ¹	45,57	b	51,65 A
Sem N	2,99	c	1,10	c	2,05 B
Média	30,36	A	23,33	B	
Nitrato (mg.L^{-1})					
Com N	7,29	a	0,65	bc	3,97 A
Sem N	4,75	ab	0,01	c	2,38 A
Média	6,02	A	0,33	B	

¹ Médias seguidas da mesma letra minúscula para efeitos de interação, e seguidas da mesma letra maiúscula para cada média, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade do erro experimental.

Segundo Camargo e Tedesco (2004), o composto oxigenado mais facilmente reduzido (mais fácil para os micro-organismos transferirem os elétrons) é o nitrato, que se perde devido à desnitrificação na camada reduzida do solo alagado. Os baixos níveis de nitrato encontrados no presente estudo, apesar da adição de nitrogênio na forma de amônio, podem ser explicados pela presença da pequena camada oxidada que está em contato com o ar, conforme descrito por Sousa *et al.* (2010), onde o amônio pode ser nitrificado. Thomas e Sodek (2006) afirmaram que a presença de nitrato durante a hipoxia no cultivo de soja aumenta a tolerância a esse estresse, o que não acontece quando a fonte de nitrogênio adicionada é o amônio. Contudo, a maioria das espécies desenvolve sintomas de toxicidade quando cultivadas em solos com moderada a alta quantidade de amônio, enquanto que há um crescimento normal quando há presença de nitrato (Britto *et al.*, 2001). Nesse aspecto, o que pode estar diferenciando uma planta sensível de uma tolerante é a

capacidade de detoxificar ou absorver em menor quantidade o amônio em excesso presente no solo alagado.

Os níveis de ferro e sódio absorvidos pelos genótipos tolerante e sensível também foram modificados de acordo com a adição ou não de nitrogênio no meio (Tabela 11). O ferro foi mais absorvido pelo genótipo tolerante na presença de nitrogênio. O sódio, por sua vez, teve maior absorção no genótipo sensível na ausência de nitrogênio no meio. O teor de ferro no tecido não pode ser utilizado para comparar toxidez entre plantas, visto que o genótipo que apresentou os maiores teores deste elemento foi o tolerante. O teor de ferro encontrado neste genótipo apesar de alto, não causou dano à planta de milho, provavelmente devido à ferritina, conforme já discutido anteriormente.

TABELA 11. Médias da concentração de ferro (Fe) e sódio (Na), analisados no tecido das plantas, na interação entre genótipo e nitrogênio. UFRGS, março de 2010.

Genótipo	Com Nitrogênio		Sem Nitrogênio		Média
	Ferro (mg.g ⁻¹)				
Tolerante	605,12	a ¹	412,25	b	508,68 A
Sensível	333,50	b	396,87	b	365,18 B
Média	469,31	A	404,56	B	
Sódio (mg.g ⁻¹)					
Tolerante	158,00	b	142,00	b	150,37 B
Sensível	220,75	ab	347,75	a	284,25 A
Média	189,75	A	244,87	A	

¹ Médias seguidas da mesma letra minúscula para efeitos de interação, e seguidas da mesma letra maiúscula para cada média, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade do erro experimental.

Os maiores teores de sódio encontrados no genótipo sensível podem ser determinantes para a maior sensibilidade ao estresse. A salinidade ocasionada pelas altas concentrações de sódio e cloreto limita o crescimento das plantas, e pode ser ocasionada por dois motivos, o efeito osmótico do sal no solo e o efeito tóxico do sal dentro da planta (Munns & Tester, 2008). Para a maioria

das espécies, o sódio parece alcançar uma concentração tóxica antes do cloreto, porém para espécies como soja, citrus e parreiras o cloreto é considerado o íon mais tóxico (Munns & Tester, 2008). Em condições salinas, a nutrição da planta com amônio estimula o influxo de cloreto, aumentando a toxicidade associada com o acúmulo desse íon (Figueira & Caldeira, 2005). A planta dispõe de três diferentes tipos de tolerância à salinidade: a tolerância ao estresse osmótico, a exclusão de sódio pelas raízes e a tolerância do tecido ao acúmulo de sódio, ou em algumas espécies de cloreto (Munns & Tester, 2008). O menor teor de sódio encontrado no tecido da planta tolerante deve-se provavelmente ao uso de algum destes mecanismos. O teor de sódio, portanto, pode ser considerado como elemento importante na manifestação da tolerância de um genótipo ao encharcamento do solo, e deve ser avaliado em estudos deste âmbito.

4.4 Perspectivas

A tolerância ao encharcamento do solo é um caráter extremamente complexo, envolvendo não somente a falta de oxigênio radicular em si, mas toda uma modificação no ambiente do solo decorrente desta carência. Este trabalho usou de métodos simples para chegar a conclusões um tanto inovadoras e que podem delinear trabalhos futuros. Contudo, há outros estudos ou outras formas de se chegar a uma resposta para esta tolerância usando de métodos bioquímicos, genômicos e moleculares, que vêm ganhando espaço nos últimos anos.

Em condições de disponibilidade de oxigênio limitante, uma completa oxidação do substrato é restrita pela perda de um receptor de elétrons. A

produção de etanol e ácido láctico através da fermentação é um mecanismo que os organismos usam para fornecer substrato e sintetizar ATP, mantendo a viabilidade da célula a curto prazo em condições de hipoxia. Há, entretanto evidências de um segundo processo operando que pode ser um fator crítico para a sobrevivência das plantas em ambientes hipóxicos: a hemoglobina (classe 1) induzida por estresse, com uma alta afinidade pelo oxigênio e o óxido nítrico, produzido via redução do nitrito (Igamberdiev & Hill, 2004). O óxido nítrico é uma pequena molécula reativa que difunde rapidamente e permeia membranas celulares, e suas formas redox-ativadas são moléculas sinalizadoras intra e intercelulares (Perazzolli *et al.*, 2006). A ampla variedade de origens de óxido nítrico sugere o requerimento de mecanismos de detoxificação em plantas para controlar os níveis desta molécula e sua reatividade e funções sinalizadoras. Hemoglobinas são mais comumente reconhecidas por sua habilidade em atuar como carregadores de oxigênio, mas elas também são importantes reguladores da homeostase de óxido nítrico (Perazzolli *et al.*, 2006). Além disso, elas mantêm os níveis de energia da célula em condições hipóxicas (Dordas, 2009). Linhagens de milho superexpressando a hemoglobina (classe 1) apresentaram atividade mais baixa da enzima álcool-desidrogenase quando comparadas com o controle, sugerindo que este mecanismo pode substituir ou auxiliar a fermentação alcoólica na disponibilidade de energia para a célula (Sowa *et al.*, 1998).

A regulação da expressão gênica em resposta à modificações ambientais é um importante fator na sobrevivência e adaptabilidade das plantas. Mecanismos transcricionais e pós-transcricionais tem sido implicados no controle da expressão gênica em resposta à submergência ou estresse por

encharcamento do solo (Zhang *et al.*, 2008). Recentes pesquisas com o gene *Sub1A* para tolerância à submergência em arroz suporta o possível envolvimento de fatores de transcrição na tolerância de plantas ao excesso de água (Fukao *et al.*, 2006). Dados de transcriptoma têm mostrado que os níveis de expressão de um número de genes são alterados em células de raízes submergidas, demonstrando o papel potencial dos mesmos em nível pós-transcricional na regulação de adaptações metabólicas, fisiológicas e morfológicas na sobrevivência de plantas de milho em condições de deficiência de oxigênio (Zhang *et al.*, 2008).

A ampla complexidade de fatores que envolvem o estresse por encharcamento do solo foi comprovada neste trabalho pelas várias interações obtidas nas análises de variância. Portanto, a seleção de genótipos contrastantes encontrada neste trabalho pode ajudar a entender melhor os aspectos que envolvem a tolerância de uma planta ao encharcamento do solo, bem como auxiliar em estudos futuros na busca de genes responsivos ao referido estresse.

5 CONCLUSÕES

A cultura do milho apresenta variabilidade genética para a tolerância ao encharcamento do solo, sendo que os genótipos com tolerância demonstraram uma coloração mais verde durante o período de estresse. No entanto, essa resposta é dependente de diversos fatores, sendo que temperatura, nível de água utilizado no encharcamento e adubação nitrogenada são fundamentais na manifestação do estresse. Temperaturas altas, adição de nitrogênio e a utilização de um nível mais severo de encharcamento tendem a causar mais danos às plantas submetidas ao estresse. As plantas tolerantes demonstraram uma concentração diferenciada alguns elementos químicos no tecido, principalmente um maior teor de ferro e um menor teor de sódio em comparação às não tolerantes.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, S.; GROVER, A. Molecular biology, biotechnology and genomics of flooding-associated low O² stress response in plants. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Philadelphia, v. 25, n. 1, p. 1-21, 2006.

ANDREWS, D. L. et al. Hypoxic and anoxic induction of alcohol-dehydrogenase in roots and shoots of seedlings of *Zea mays* - Adh transcripts and enzyme-activity. **Plant Physiology**, Austin, v. 101, n. 2, p. 407-414, 1993.

ARMSTRONG, W. Aeration in higher plants. In: WOODHOUSE, H. W. W. (Ed.). **Advances in botanical research**. New York: Academic Press, 1979. p. 225-332.

ARMSTRONG, W.; BRANDLE, R.; JACKSON, M. B. Mechanisms of flood tolerance in plants. **Acta Botanica Neerlandica**, Amsterdam, v. 43, n. 4, p. 307-358, 1994.

ASCHI-SMITH, S. et al. Assessment of enzyme induction and aerenchyma formation as mechanisms for flooding tolerance in *Trifolium subterraneum* 'Park'. **Annals of Botany**, Oxford, v. 91, n. 2, p. 195-204, 2003.

BAILEY-SERRES, J.; CHANG, R. Sensing and signalling in response to oxygen deprivation in plants and other organisms. **Annals of Botany**, Oxford, v. 96, n. 4, p. 507-518, 2005.

BAILEY-SERRES, J.; VOESENEK, L. A. C. J. Flooding stress: acclimations and genetic diversity. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 59, n. 1, p. 313-339, 2008.

BARRETT-LENNARD, E. G. The interaction between waterlogging and salinity in higher plants: causes, consequences and implications. **Plant and Soil**, Crawley, v. 253, n. 1, p. 35-54, 2003.

BOARD, J. E. Waterlogging effects on plant nutrient concentrations in soybean. **Journal of Plant Nutrition**, Georgia, v. 31, n. 5, p. 828-838, 2008.

BORU, G. et al. Expression and inheritance of tolerance to waterlogging stress in wheat. **Euphytica**, Dordrecht, v. 117, n. 2, p. 91-98, 2001.

BRITTO, D. T.; KRONZUCKER, H. J. NH_4^+ toxicity in higher plants: a critical review. **Journal of Plant Physiology**, Leipzig, v. 159, n. 6, p. 567-584, 2002.

BRITTO, D. T. et al. Futile transmembrane NH_4^+ cycling: A cellular hypothesis to explain ammonium toxicity in plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 98, n. 7, p. 4255-4258, 2001.

BUCKLER, E. S.; GAUT, B. S.; MCMULLEN, M. D. Molecular and functional diversity of maize. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 9, n. 2, p. 172-176, 2006.

CAMARGO, F. A. O.; TEDESCO, M. J. Solos Alagados. In: BISSANI, C. A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M. J. (Ed.). **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Genesis, 2004. p. 187-193.

COLMER, T. D. Aerenchyma and an inducible barrier to radial oxygen loss facilitate root aeration in upland, paddy and deep-water rice (*Oryza sativa* L.). **Annals of Botany**, Oxford, v. 91, n. 2, p. 301-309, 2003.

COLMER, T. D.; GREENWAY, H. Ion transport in seminal and adventitious roots of cereals during O_2 deficiency. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 62, n. 1, p. 39-57, 2011.

CONAB. **Indicadores da agropecuária**. Brasília: Companhia Nacional do Abastecimento, 2011. 63 p.

DENNIS, E. S.; MILLAR, A.; DOLFERUS, R. Molecular analysis of the response of anaerobic stress. In: KUO, G. C. (Ed.). **Adaptation of food crops to temperature and water stress**. Taiwan: Asian Vegetable Research and Development Center, 1993. p. 59-67.

DOEBLEY, J. The genetics of maize evolution. **Annual Review of Genetics**, Palo Alto, v. 38, n. 1, p. 37-59, 2004.

DOEBLEY, J.; BACIGALUPO, A.; STEC, A. Inheritance of kernel weight in two maize-teosinte hybrid populations - implications for crop evolution. **Journal of Heredity**, Oxford, v. 85, n. 3, p. 191-195, 1994.

DOEBLEY, J. et al. Genetic and morphological analysis of a maize teosinte F2 population - implications for the origin of maize. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 87, n. 24, p. 9888-9892, 1990.

DORDAS, C. Nonsymbiotic hemoglobins and stress tolerance in plants. **Plant Science**, Davis, v. 176, n. 4, p. 433-440, 2009.

DREW, M. C. Oxygen deficiency and root metabolism: injury and acclimation under hypoxia and anoxia. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 48, p. 223-250, 1997.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FIGUEIRA, E. M. D.; CALDEIRA, G. C. N. Effect of nitrogen nutrition on salt tolerance of *Pisum sativum* during vegetative growth. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Hoboken, v. 168, n. 3, p. 359-363, 2005.

FUKAO, T. et al. A variable cluster of ethylene response factor-like genes regulates metabolic and developmental acclimation responses to submergence in rice(W). **Plant Cell**, Austin, v. 18, n. 8, p. 2021-2034, 2006.

GALINAT, W. C. The origin of corn. In: SPRAGUE, G. F. (Ed.). **Corn and corn improvement**. Madison: American Sociedade Agronomic, 1977. p. 47.

_____. Evolution of corn. In: SPARKS, D. L. (Ed.). **Advances in agronomy**. London: Academic Press, 1992. p. 403.

GAUT, B. S. et al. Maize as a model for the evolution of plant nuclear genomes. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 97, n. 13, p. 7008-15, 2000.

GOMES, A. D. S.; SOUSA, R. O.; PAULETTO, E. A. Plantio direto e cultivo mínimo em solos de várzea, com ênfase ao arroz irrigado. In: MARCHEZAN, E. (Ed.). **Arroz irrigado: uso intensivo e sustentável de várzeas**. Passo Fundo: Aldeia Norte, 2002. p. 19-41.

GOODMAN, M. M. História e origem do milho. In: PATERNIANI, E.; VIÉGAS, G. P. (Ed.). **Melhoramento e produção de milho**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 3-23.

HOLZSCHUH, M. J. et al. Rice growth as affected by combined ammonium and nitrate supply. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1323-1331, 2009.

HUANG, B. R.; LIU, X. Z.; FRY, J. D. Shoot physiological responses of two bentgrass cultivars to high temperature and poor soil aeration. **Crop Science**, Madison, v. 38, n. 5, p. 1219-1224, 1998.

HUANG, S.; GREENWAY, H.; COLMER, T. D. Responses by coleoptiles of intact rice seedlings to anoxia: K⁺ net uptake from the external solution and translocation from the caryopses. **Annals of Botany**, Oxford, v. 91, n. 2, p. 271-278, 2003.

HUQ, E.; HODGES, T. K. An anaerobically inducible early (aie) gene family from rice. **Plant Molecular Biology**, Zurich, v. 40, n. 4, p. 591-601, 1999.

IGAMBERDIEV, A. U.; HILL, R. D. Nitrate, NO and haemoglobin in plant adaptation to hypoxia: an alternative to classic fermentation pathways. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 55, n. 408, p. 2473-2482, 2004.

IRFAN, M. et al. Physiological and biochemical changes in plants under waterlogging. **Protoplasma**, Wien, v. 241, n. 1-4, p. 3-17, 2010.

KAWASE, M. Anatomical and morphological adaptation of plants to waterlogging. **Hortscience**, Alexandria, v. 16, n. 1, p. 30-34, 1981.

KENNEDY, R. A.; RUMPHO, M. E.; FOX, T. C. Anaerobic metabolism in plants. **Plant Physiology**, Austin, v. 100, n. 1, p. 1-6, 1992.

KOZLOWSKI, T. T. Responses of woody plants to flooding and salinity. **Tree Physiology Monograph**, Victoria, v. 1, n. 1, p. 1-29, 1997.

KRONZUCKER, H. J. et al. Comparative kinetic analysis of ammonium and nitrate acquisition by tropical lowland rice: implications for rice cultivation and yield potential. **New Phytologist**, Lancaster, v. 145, n. 3, p. 471-476, 2000.

LANDAU, E. C.; SANS, L. M. A.; SANTANA, D. P. Clima e solo. In: CRUZ, J. C. (Ed.). **Cultivo do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. (Sistema de Produção, 1).

LASZLO, A.; LAWRENCE, P. Parallel induction and synthesis of pdc and adh in anoxic maize roots. **Molecular & General Genetics**, Sweden, v. 192, n. 1-2, p. 110-117, 1983.

LEMKEKEYES, C. A.; SACHS, M. M. Genetic-variation for seedling tolerance to anaerobic stress in maize germplasm. **Maydica**, Bergamo, v. 34, n. 4, p. 329-337, 1989.

LOPES, M. A.; PARENTONI, S. N.; MAGNAVACA, R. Adaptaciones morfológicas y fisiológicas em plantas de maiz sometidas a deficiência de oxigeno en el suelo. In: SEMINÁRIO MEJORAMIENTO PARA TOLERÂNCIA A FACTORES AMBIENTALES ADVERSOS EN EL CULTIVO DEL MAIZ, 2., 1988, Quito. **Anais...** Quito: IICA/BID/PROCIANDINO, 1988. p. 106-124.

MAK, D. O. D. et al. Characterization of ammonia transport by the kidney Rh glycoproteins RhBG and RhCG. **American Journal of Physiology-Renal Physiology**, Bethesda, v. 290, n. 2, p. F297-F305, 2006.

MANGELSDORF, P. C. **Corn, its origin, evolution and improvement**. Cambridge: Harvard University Press, 1974. 262 p.

MCDONALD, G. K.; GARDNER, W. K. Effect of waterlogging on the grain-yield response of wheat to sowing date in southwestern victoria. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Gatton, v. 27, n. 5, p. 661-670, 1987.

MOLINA, M. C.; POGGIO, L.; NARANJO, C. Cytogenetic analysis in *Zea mays* ssp. *mays* x *Zea mays* ssp. *parviglumis* and *Zea mays* ssp. *mays* x *Zea mays* ssp. *mexicana*. **Maize Genetics Cooperation News Letter**, Missouri, v. 107, n. 66, p. 60, 1992.

MOTTA, A. et al. Ferritin synthesis in response to iron in the Fe-inefficient maize mutant ys3. **Plant Physiology and Biochemistry**, Bari, v. 39, n. 6, p. 461-465, 2001.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 59, p. 651-681, 2008.

PATERNIANI, E.; CAMPOS, M. S. Melhoramento de milho. In: BORÉM, A. (Ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: UFV, 1999. p. 817.

PERAZZOLLI, M.; ROMERO-PUERTAS, M. C.; DELLEDONNE, M. Modulation of nitric oxide bioactivity by plant haemoglobins. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 57, n. 3, p. 479-488, 2006.

PFISTERSIEBER, M.; BRANDLE, R. Aspects of plant behavior under anoxia and postanoxia. **Proceedings of the Royal Society of Edinburgh Section B-Biological Sciences**, Edinburgh, v. 102B, p. 313-324, 1994.

PINTO, L. F. S. et al. Caracterização de solos de várzea. In: GOMES, A. D. S. e PAULETTO, E. A. (Ed.). **Manejo de solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p. 11-36.

PIPERNO, D. R.; FLANNERY, K. V. The earliest archaeological maize (*Zea mays* L.) from highland Mexico: new accelerator mass spectrometry dates and their implications. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 98, n. 4, p. 2101-2103, 2001.

POEHLMAN, J. M.; SLEPER, D. A. **Breeding field crops**. Ames: Iowa State University, 1995. 494 p.

POGGIO, L. et al. Evolutionary relationships in the genus *Zea*: analysis of repetitive sequences used as cytological FISH and GISH markers. **Genetics and Molecular Biology**, Ribeirão Preto, v. 23, n. 4, p. 1021-1027, 2000.

PONNAMPERUMA, F. N. Citation classic - the chemistry of submerged soils. **Current Contents/Agriculture Biology & Environmental Sciences**, Philadelphia, v. 14, n. 22, p. 18-18, 1983.

PRESSOIR, G.; BERTHAUD, J. Population structure and strong divergent selection shape phenotypic diversification in maize landraces. **Heredity**, Basingstoke, v. 92, n. 2, p. 95-101, 2004.

RANNO, S. K. et al. Phosphorus adsorption capacity in lowland soils of Rio Grande do Sul State. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 21-28, 2007.

REYNA, N. et al. Evaluation of a QTL for waterlogging tolerance in southern soybean germplasm. **Crop Science**, Madison, v. 43, n. 6, p. 2077-2082, 2003.

RITCHIE, S.; HANWAY, J. J. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology/ Cooperative Extension Service, 1989. 21 p. (Special Report, 48).

ROBERTS, J. K. et al. Cytoplasmic acidosis as a determinant of flooding intolerance in plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 81, n. 19, p. 6029-33, 1984.

RUSSELL, D. A.; SACHS, M. M. Protein-synthesis in maize during anaerobic and heat-stress. **Plant Physiology**, Austin, v. 99, n. 2, p. 615-620, 1992.

SAAB, I. N.; SACHS, M. M. Complete cDNA and genomic sequence encoding a flooding-responsive gene from maize (*Zea mays* L) homologous to xyloglucan endotransglycosylase. **Plant Physiology**, Austin, v. 108, n. 1, p. 439-440, 1995.

_____. A flooding-induced xyloglucan endo-transglycosylase homolog in maize is responsive to ethylene and associated with aerenchyma. **Plant Physiology**, Austin, v. 112, n. 1, p. 385-391, 1996.

SACHS, M. M.; FREELING, M. Selective synthesis of alcohol-dehydrogenase during anaerobic treatment of maize. **Molecular & General Genetics**, Sweden, v. 161, n. 2, p. 111-115, 1978.

SACHS, M. M.; FREELING, M.; OKIMOTO, R. The anaerobic proteins of maize. **Cell**, Philadelphia, v. 20, n. 3, p. 761-767, 1980.

SACHS, M. M.; SUBBAIAH, C. C.; SAAB, I. N. Anaerobic gene expression and flooding tolerance in maize. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 47, n. 294, p. 1-15, 1996.

SAIRAM, R. K.; KUMUTHA, D.; EZHILMATHI, K. Waterlogging tolerance: nonsymbiotic haemoglobin-nitric oxide homeostasis and antioxidants. **Current Science**, Bangalore, v. 96, n. 5, p. 674-682, 2009a.

SAIRAM, R. K. et al. Waterlogging induced oxidative stress and antioxidant enzyme activities in pigeon pea. **Biologia Plantarum**, Na Karlovce, v. 53, n. 3, p. 493-504, 2009b.

SAS. **User's guide**: version 6.4. Cary: SAS Institute, 1989. 846 p.

SCHILD, L. N. et al. Comportamento do milho, em planossolo, sob condições de excesso hídrico. I - Desempenho agrônômico. **Agropecuária Clima Temperado**, Pelotas, v. 2, n. 1, p. 97-109, 1999.

SETTER, T. L. et al. Physiology and genetics of submergence tolerance in rice. **Annals of Botany**, Oxford, v. 79, p. 67-77, 1997.

_____. Review of wheat improvement for waterlogging tolerance in Australia and India: the importance of anaerobiosis and element toxicities associated with different soils. **Annals of Botany**, Oxford, v. 103, n. 2, p. 221-235, 2009.

SILVA, S. et al. Inheritance of tolerance to flooded soils in maize. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 7, n. 2, p. 165-172, 2007.

SILVA, S. D. A. et al. Genetic parameters and QTL for tolerance to flooded soils in maize. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 5, n. 2, p. 287-293, 2005.

SILVA, S. D. D. A. E. et al. Capacidade combinatória de genótipos de milho para tolerância ao encharcamento do solo. **Ciencia Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 391-396, 2006.

SOUSA, C. A. F.; SODEK, L. Alanine metabolism and alanine aminotransferase activity in soybean (*Glycine max*) during hypoxia of the root system and subsequent return to normoxia. **Environmental and Experimental Botany**, Paris, v. 50, n. 1, p. 1-8, 2003.

SOUSA, R.; CAMARGO, F. A. O.; VAHL, L. C. Solos alagados: (reações de redox). In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Evangraf, 2010. p. 171-195.

SOWA, A. W. et al. Altering hemoglobin levels changes energy status in maize cells under hypoxia. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 95, n. 17, p. 10317-10321, 1998.

STRECK, V. S. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222 p.

SUBBIAH, C. C.; SACHS, M. M. Molecular and cellular adaptations of maize to flooding stress. **Annals of Botany**, Oxford, v. 91, n. 2, p. 119-127, 2003.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Agronomia, 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

THOMAS, A.; SODEK, L. Development of the nodulated soybean plant after flooding of the root system with different sources of nitrogen. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 291-297, 2005.

THOMAS, A. L.; SODEK, L. Amino acid and ureide transport in the xylem of symbiotic soybean plants during short-term flooding of the root system in the presence of different sources of nitrogen. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas, v. 18, p. 333-339, 2006.

USDA. **Grain:** world markets and trade. Washington: United States Department of Agriculture, 2011. 60 p. (Foreign Agricultural Service - FG 05-11).

VANTOAI, T. T. et al. Genetic-variability for flooding tolerance in soybeans. **Crop Science**, Madison, v. 34, n. 4, p. 1112-1115, 1994.

_____. Identification of a QTL associated with tolerance of soybean to soil waterlogging. **Crop Science**, Madison, v. 41, n. 4, p. 1247-1252, 2001.

VARTAPETIAN, B. B.; JACKSON, M. B. Plant adaptations to anaerobic stress. **Annals of Botany**, Oxford, v. 79, p. 3-20, 1997.

VISSER, E. J. W. et al. Flooding and plant growth. **Annals of Botany**, Oxford, v. 91, n. 2, p. 107-109, 2003.

WANG, K. H.; BIAN, S. M.; JIANG, Y. W. Anaerobic metabolism in roots of Kentucky bluegrass in response to short-term waterlogging alone and in combination with high temperatures. **Plant and Soil**, Crawley, v. 314, n. 1-2, p. 221-229, 2009.

WANG, R. L. et al. The limits of selection during maize domestication. **Nature**, London, v. 398, n. 6724, p. 236-239, 1999.

WHITE, S.; DOEBLEY, J. Of genes and genomes and the origin of maize. **Trends in Genetics**, Oxford, v. 14, n. 8, p. 327-332, 1998.

WIETHOLTER, P. et al. Genetic variability in corn landraces from southern Brazil. **Maydica**, Bergamo, v. 53, n. 2, p. 151-159, 2008.

WIGNARAJAH, K.; GREENWAY, H. Effect of anaerobiosis on activities of alcohol-dehydrogenase and pyruvate decarboxylase in roots of zea-mays. **New Phytologist**, Lancaster, v. 77, n. 3, p. 575-584, 1976.

XU, K. N.; MACKILL, D. J. A major locus for submergence tolerance mapped on rice chromosome 9. **Molecular Breeding**, Lleida, v. 2, n. 3, p. 219-224, 1996.

ZAIDI, P. H. et al. Tolerance to excess moisture in maize (*Zea mays* L.): susceptible crop stages and identification of tolerant genotypes. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 90, n. 2-3, p. 189-202, 2004.

ZHANG, Z. X. et al. Submergence-responsive microRNAs are potentially involved in the regulation of morphological and metabolic adaptations in maize root cells. **Annals of Botany**, Oxford, v. 102, n. 4, p. 509-519, 2008.

ZHOU, M. Improvement of plant waterlogging tolerance. In: MANCUSO, S.; SHABALA, S. (Ed.). **Waterlogging signalling and tolerance in plants**. Berlin: Springer, 2010. p. 267-285.

7 APÊNDICE

APÊNDICE 1. Laudo de Análise de Solo realizado pelo Laboratório de Análise de Solo da Faculdade de Agronomia da UFRGS.



FACULDADE DE AGRONOMIA - DEPTO. DE SOLOS
LABORATÓRIO DE ANÁLISES

40 anos
Servindo à Agricultura

Laudo de Análise de Solo

NOME: Profº José Fernandes Barbosa Neto
 MUNICÍPIO: Cachoeirinha do Sul
 ESTADO: RS
 LOCALIDADE:

DATA DO RECEBIMENTO: 22/08/08
 DATA DA EXPEDIÇÃO: 02/09/08

NUM	REGISTRO	ARGILA	pH	Índice	P	K	M.O.	Al _{troc.}	Ca _{troc.}	Mg _{troc.}
		%	H ₂ O	SMP	mg/dm ³	mg/dm ³	%	cmol/dm ³	cmol/dm ³	cmol/dm ³
1	182/33	50	4.7	5.2	4.4	50	1.6	1.4	1.0	0.6

Argila determinada pelo método do densímetro; pH em água 1:1; P e K determinados pelo método Mehlich I; M.O. por digestão úmida; Ca, Mg, Al, Mn, e Na trocáveis extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; S-SO₄ extraído com CaHPO₄ 500 mg L⁻¹ de P; Zn e Cu extraídos com HCl 0,1 mol L⁻¹; B extraído com água quente.

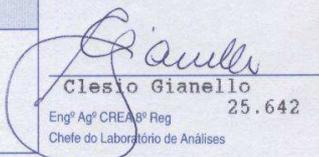
NUM	Al+H cmol/dm ³	CTC cmol/dm ³	% SAT da CTC		RELAÇÕES			SUGESTÃO DE CALAGEM p/PRNT (t ha ⁻¹)			
			BASES	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	100	85	70	55
1	10.9	12.7	14	44.4	1.7	8	4.7				

CTC a pH 7.0. Necessidade de calcário para atingir pH 6,0 - calculada pela média dos métodos SMP e Al+MO. Sugestão válida no caso de não ter sido feita calagem integral nos últimos 3 anos e sob sistema de cultivo convencional. No sistema plantio direto, consultar um agrônomo.

NUM	S	Zn	Cu	B	Mn	Fe	Na	OUTRAS DETERMINAÇÕES
	mg/dm ³	g/dm ³	mg/dm ³					
1	21	0.9	0.4	0.2	12			

Consulte um agrônomo para obter as recomendações de adubação

NUM	IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA
1	01- várzea



Clesio Gianello
 Engº Agº CREA 8º Reg 25.642
 Chefe do Laboratório de Análises

Laboratório de Análises de Solo - Av. Bento Gonçalves, 7712 - Porto Alegre - RS - CEP 91540-000
 Fones/Fax: (0xx51) 3308-6023 - 3308-7457 - 3308-7459 - E-mail: labsolos@bol.com.br

8 VITA

Noryam Bervian Bispo é filha de Mayron Roberto Furtado Bispo e de Maria de Lourdes Bervian Bispo. Nasceu em Tapera – RS em 12 de maio de 1983. Coursou o Ensino Fundamental no Colégio Notre Dame, em Passo Fundo – RS, na Escola Estadual de Ensino Fundamental Bandeirantes e na Escola Municipal de Ensino Fundamental João Antônio de Col, ambas em Sertão – RS. Coursou Ensino Médio na Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI), localizada em Erechim – RS. Em 2000 ingressou no Curso de Agronomia da Universidade de Passo Fundo (UPF), Passo Fundo – RS, onde graduou-se Engenheira Agrônoma em 2005. No mesmo ano, iniciou o Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS. Obteve o grau de Mestre em Fitotecnia em julho de 2007. Em agosto do mesmo ano ingressou no curso de Doutorado em Fitotecnia na UFRGS, com apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).