



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

EDILAINE DA SILVA MARQUES

**SOLOS COM CARÁTER COESO: LIMITAÇÕES DO ESPAÇO POROSO LIVRE DE
ÁGUA NO DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO DO MILHO**

FORTALEZA

2019

EDILAINE DA SILVA MARQUES

SOLOS COM CARÁTER COESO: LIMITAÇÕES DO ESPAÇO POROSO LIVRE DE
ÁGUA NO DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO DO MILHO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciência do Solo. Área de concentração: Pedologia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M316s Marques, Edilaine da Silva.
Solos com caráter coeso: limitações do espaço poroso livre de água no desenvolvimento vegetativo do milho / Edilaine da Silva Marques. – 2019.
82 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Ricardo Espindola Romero.
1. Adensamento. 2. Hipóxia. 3. Porosidade de aeração. 4. Resistência à penetração. 5. Tabuleiros costeiros. I. Título.

CDD 631.4

EDILAINE DA SILVA MARQUES

SOLOS COM CARÁTER COESO: LIMITAÇÕES DO ESPAÇO POROSO LIVRE DE
ÁGUA NO DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO DO MILHO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciência do Solo. Área de concentração: Pedologia.

Aprovada em: 31/07/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr^a. Antônia Gislaine Brito Marques Albuquerque
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Dr^a. Ana Leônia de Araujo Girão
Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará (SEMACE)

A Deus

À minha mãe, Rosilda Silva.

À minha irmã, Rosilene Sousa.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua infinita misericórdia e bondade. Pelo amor e cuidado dispensados a mim todos os dias.

À minha mãe Rosilda Soares e minha irmã Rosilene Sousa pelo amor, apoio e compreensão durante todo esse tempo.

À Universidade Federal do Ceará, em especial ao Departamento de Pós-Graduação em Ciência do Solo (docentes, discentes e funcionários).

Ao meu orientador, Ricardo Espíndola Romero, pelos ensinamentos, amizade, paciência, compreensão e pela calma que sempre me transmitiu.

Ao professor Jaedson Mota, pelos ensinamentos, paciência e disponibilidade em sempre me ajudar, todas as vezes que precisei e pelo exemplo de humildade que vejo nele. Além da disponibilidade com o uso do laboratório de Física do Solo e por aceitar o convite de participar da banca de avaliação.

Ao professor Claudivan Lacerda, por todos os ensinamentos a mim transmitidos, pela grande ajuda no trabalho e pela imensa generosidade e prestatividade. Além do auxílio com os equipamentos para as avaliações durante o experimento e por aceitar participar da banca de avaliação.

À professora Gislane Albuquerque e Ana Leônia por aceitarem o convite de participar da banca avaliadora, pelo tempo dedicado e pelas contribuições.

Aos professores Ismail Soares, Rosilene Mesquita e Marcos Esmeraldo pela valiosa contribuição para realização desse trabalho. Além dos Professores Mírian Costa e Raul Toma, pela solicitude.

Às amigas especiais Eurileny Almeida, Nayara Rochelli e Vanessa Ohana, pela preciosa amizade, desde o primeiro semestre, pelas conversas, risadas e toda ajuda durante minha jornada em Fortaleza.

À minha amiga especial, Gleiciane Silva, pela linda amizade, ajuda, prestatividade, companheirismo e preocupação. Pelas risadas, inúmeras risadas... muitas delas para aguentar os percalços, que não foram poucos.

Aos bolsistas, Leonardo Távora, Luiza Lima, Sabrina Sousa e Sharon Gomes por toda ajuda e amizade. Além da Júlia Vieira e Adriana Oliveira pela prestatividade na realização desse trabalho e carinho que sempre tiveram comigo.

Aos colegas do programa de Pós-Graduação Ciência do Solo: Rafinha, Cillas, Nathielly, Juliana, Carlinha, Ícaro, Luís, Israel, Ana Carla, Emanuela, Jardelson, Gilcivan e Denise pela ajuda e pelos conhecimentos compartilhados.

À minha prima e irmã Ilvanice Rodrigues da Silva, que sempre esteve comigo, mesmo com a longa distância que nos separava. Sua companhia e orações foram muito importantes durante essa jornada.

Aos grandes amigos da Igreja Batista Kháris: Pastor Alberilo e Irmã Débora, Pastor Ézio e Irmã Helena, Silvinha, Luis Teixeira e Vera Teixeira pela preciosa amizade e por cultivar comigo o caminho da fé.

Aos funcionários do laboratório de Solos do Departamento de Ciências do Solo UFC/FUNCEME pela imensurável ajuda nas análises, amizade e ótimos momentos de descontração: Antônio José, Geórgia, Amilson, Tavares e Vilalba. Além das funcionárias dos Laboratórios de Química e Manejo do solo: Fátima e Deyse.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento profissional e que não tenham sido, aqui, nominalmente citados, mas sou imensamente grata a cada um.

RESUMO

Os solos com caráter coeso, em virtude de suas características físicas, podem ocasionar limitações ao cultivo de plantas. Essas limitações estão associadas, principalmente, ao maior impedimento físico à penetração de raízes, assim como à maior dificuldade de absorção de água pelas plantas quando o solo se encontra sob maiores porosidades de aeração. Entretanto, em condição de baixas porosidades de aeração, pode haver restrição nos processos de trocas gasosas. Diante desse contexto, aventou-se a hipótese de que os horizontes com caráter coeso, na umidade que o solo ainda não atingiu a consistência dura à extremamente dura, podem apresentar porosidades de aeração que afetam o desenvolvimento vegetativo de plantas. Assim, objetivou-se conhecer a influência do horizonte com caráter coeso, mantido em condições de umidade com diferentes porosidades de aeração, no desenvolvimento de plantas de milho. O experimento foi conduzido em Fortaleza-CE, em um delineamento em blocos casualizados, com cinco porosidades de aeração (PA) (0,04; 0,06; 0,09; 0,11 e 0,13 cm³ cm⁻³) e seis repetições. Cada unidade experimental foi composta de uma planta por vaso com 40 cm (20 cm de horizonte A e 20 cm de horizonte B com caráter coeso). As variáveis analisadas foram: permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}); trocas gasosas e variáveis biométricas; e nutricionais. Acréscimos na PA proporcionaram aumento na K_{ar} . As PA de 0,04 e 0,13 cm³ cm⁻³ proporcionaram menores taxas fotossintéticas (A), com 24,54 e 25,50 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente; menor concentração interna de CO_2 com 140,72 e 118,66 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, respectivamente; menor diâmetro (24,22 e 24,19 mm, respectivamente) e comprimento do colmo (57,5 e 52,5 cm, respectivamente); as limitações na menor PA estão relacionadas ao estado de hipóxia no solo e na maior PA, ligadas ao déficit hídrico leve. A condutância estomática (0,158 mol $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração (4,77 mmol $\text{H}_2\text{O m}^2 \text{ s}^{-1}$) e os teores de nitrogênio (17,6 g kg^{-1}) e potássio (23,6 g kg^{-1}) foram menores nas maiores PA. A massa seca de raízes no horizonte A e B com caráter coeso foi menor na menor PA (18 e 11,9 g, respectivamente). Conclui-se que as PA de 0,04 cm³ cm⁻³ reduziram o desenvolvimento da planta de milho, devido à condição de hipóxia do solo. Já a PA 0,13 cm³ cm⁻³, houve redução na A e nas variáveis comprimento e diâmetro do colmo, essas ligadas ao déficit hídrico leve no solo. A faixa de PA intermediária apresentou as maiores taxas fotossintéticas, maiores diâmetros e comprimento caulinar em relação aos tratamentos extremos.

Palavras-chave: adensamento; hipóxia; porosidade de aeração; resistência à penetração; tabuleiros costeiros.

ABSTRACT

Soils with a cohesive character, due to their physical characteristics, can cause limitations to the cultivation of plants. These limitations are mainly associated with a greater physical impediment to the penetration of roots, as well as with a greater difficulty in absorbing water by plants when the soil is under greater aeration porosities. However, in conditions of low aeration porosities, there may be restrictions in the gas exchange processes. Considering this context, it was hypothesized that horizons with a cohesive character, in the moisture that the soil has not yet reached a hard to extremely hard consistency, may present aeration porosities that affect the vegetative development of plants. Thus, the objective was to know the influence of the horizon with a cohesive character, maintained in humidity conditions with different aeration porosities, in the development of maize plants. The experiment was carried out in Fortaleza-CE, in a randomized block design, with five aeration porosities (PA) (0.04; 0.06; 0.09; 0.11 and 0.13 cm³ cm⁻³) and six repetitions. Each experimental unit was composed of one plant per pot with 40 cm (20 cm horizon A and 20 cm horizon B with a cohesive character). The variables analyzed were: intrinsic permeability from soil to air (Kar); gas exchanges and biometric variables; and nutritional ones. Additions to PA provided an increase in Kar. The PA of 0.04 and 0.13 cm³ cm⁻³ provided lower photosynthetic rates (A), with 24.54 and 25.50 μmol CO₂ m² s⁻¹, respectively; lower internal CO₂ concentration with 140.72 and 118.66 μmol mol⁻¹, respectively; smaller diameter (24.22 and 24.19 mm, respectively) and stem length (57.5 and 52.5 cm, respectively); the limitations in the lowest PA are related to the state of hypoxia in the soil and in the highest PA, linked to the mild water deficit. Stomatal conductance (0.158 mol H₂O m⁻² s⁻¹), transpiration (4.77 mmol H₂O m² s⁻¹) and nitrogen (17.6 g kg⁻¹) and potassium (23.6 g kg⁻¹) were lower in the largest PA. The dry mass of roots in the horizon A and B with a cohesive character was lower in the lowest PA (18 and 11.9 g, respectively). It was concluded that the PA of 0.04 cm³ cm⁻³ reduced the development of the maize plant, due to the condition of hypoxia of the soil. On the other hand, the PA 0.13 cm³ cm⁻³, there was a reduction in the A and in the stem length and diameter variables, these linked to the slight water deficit in the soil. The intermediate PA range showed the highest photosynthetic rates, largest diameters and stem length in relation to extreme treatments.

Keywords: density; hypoxia; aeration porosity; resistance to penetration; coastal tablelands.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização dos Tabuleiros Costeiros no Nordeste do Brasil.....	15
Figura 2 - Localização da área experimental.....	30
Figura 3 - Vista da área experimental.....	30
Figura 4 - Localização da área onde ocorreu a coleta de solo.....	29
Figura 5 - Vista geral da coleta do solo (A); coleta do solo do horizonte A (B); coleta do solo do horizonte B com caráter coeso (C).....	30
Figura 6 - Mesa de tensão (A) e extrator de Richards (B) usados para a confecção das curvas característica de retenção de água no solo (CCRAS).....	33
Figura 7 - Curva característica de retenção de água no solo para o horizonte A, e o horizonte B com caráter coeso.....	34
Figura 8 - Croqui do experimento	36
Figura 9 - Vista geral das unidades experimentais	36
Figura 10 - Camada de solo do horizonte B com caráter coeso (A); Montagem da camada de solo do horizonte A sobre a camada do B (B); Preenchimento da camada de solo do horizonte A (C).....	37
Figura 11 - Confecção dos tensiômetros	40
Figura 12 - Instalação dos tensiômetros	40
Figura 13 - Avaliação das trocas gasosas foliares nas plantas de milho	41
Figura 14 - Avaliação do conteúdo de clorofila nas folhas de plantas de milho	42
Figura 15 - Mensuração do diâmetro do caule das plantas do milho	43
Figura 16 - Mensuração da área foliar das plantas do milho.....	43
Figura 17 - Fotossíntese: A (A); Condutância estomática: g_s (B) em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração	49
Figura 18 - Transpiração: E (A); Concentração interna de CO_2 (B) em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração	55
Figura 19 - Eficiência instantânea de carboxilação: E_iC (A); Eficiência intrínseca do uso da água: EUA_{int} (B) em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração	57
Figura 20 - Temperatura da folha: (A) e índice SPAD (B) em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração	60
Figura 21 - Massa seca de raiz do horizonte B (A); Massa seca de raiz do horizonte A (B) em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração	61

Figura 22 - Razão raiz/parte aérea em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração	62
Figura 23 - Massa seca total em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração	63
Figura 24 - Massa seca das raízes adventícias (A) e Massa seca da parte aérea (B) em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração	64
Figura 25 - Massa seca de raízes no horizonte A e no horizonte B com caráter coeso	64
Figura 26 - Comprimento do colmo (A); Diâmetro caulinar (B) em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração	66
Figura 27 - Área foliar em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração	70
Figura 28 - Teores de nitrogênio (A) e potássio (B) na parte aérea de plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Caracterização química do horizonte A e horizonte B com caráter coeso.....	30
Tabela 2	- Características físicas do solo (granulometria, argila natural (AN), classe textural e densidade de partículas).....	31
Tabela 3	- Resistência à penetração no horizonte B com caráter coeso na tensão de 10 kPa	32
Tabela 4	- Valores dos parâmetros de ajuste (α , m, n) e θ_r e θ_s da equação de van Genuchten (1980) para os horizontes A e B com caráter coeso	34
Tabela 5	- Valores de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do horizonte A e horizonte B com caráter coeso	35
Tabela 6	- Variáveis atmosféricas no momento das leituras	42
Tabela 7	- Permeabilidade intrínseca do solo ao ar no horizonte B com caráter coeso, com o desvio padrão da média, em diferentes porosidades de aeração.....	46
Tabela 8	- Índice de continuidade de poros (B) no horizonte B com caráter coeso, com o desvio padrão da média, em diferentes porosidades de aeração.....	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	Tabuleiros costeiros	15
2.2	Solos dos tabuleiros costeiros	16
2.3	Formação e ocorrência dos solos com caráter coeso	17
2.4	Atributos físicos de solos com caráter coeso	18
2.4.1	<i>Densidade do solo</i>	18
2.4.2	<i>Porosidade total, macro e microporosidade</i>	19
2.4.3	<i>Permeabilidade intrínseca do solo ao ar e índice de continuidade de poros</i>	21
2.5	Desenvolvimento de plantas em solos com caráter coeso	23
2.6	A cultura do milho	25
3	MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1	Localização e caracterização da área experimental	28
3.2	Coleta e caracterização do solo utilizado	29
3.2.1	<i>Coleta do solo</i>	29
3.2.2	<i>Caracterização química do solo</i>	30
3.2.3	<i>Caracterização física do solo</i>	31
3.2.3.1	<i>Granulometria, argila natural, classe textural e densidade de partículas</i>	31
3.2.3.2	<i>Resistência do solo à penetração</i>	32
3.2.3.3	<i>Curva característica de retenção de água no solo</i>	32
3.4	Montagem e condução do experimento	37
3.5	Variáveis analisadas	40
3.5.1	<i>Variáveis do solo: permeabilidade intrínseca do solo ao ar e índice de continuidade de poros</i>	40
3.5.2	<i>Variáveis da planta</i>	41
3.6	Análise estatística	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	Variáveis físicas do solo: permeabilidade intrínseca do solo ao ar e Índice de continuidade de poros	46
4.2	Variáveis da planta	47
4.3	Teores de nutrientes na parte aérea	68

5	CONCLUSÕES	72
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Os solos dos Tabuleiros Costeiros, associados à Formação Barreiras, englobam uma extensa área do território brasileiro, atingindo aproximadamente 20 milhões de hectares e distribuem-se desde o estado do Amapá ao estado do Rio de Janeiro (REZENDE, 2000). É possível encontrá-los no Nordeste do país em todos os estados da região (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2000).

A importância social e econômica da região dos Tabuleiros Costeiros resulta do fato dessa unidade geomorfológica estar situada próxima a grandes polos comerciais, com alta densidade populacional e numerosas vias de circulação que permitem escoar a produção. Além disso, diversas culturas agrícolas perenes, semiperenes e anuais podem ser cultivadas nessa região, tais como cana de açúcar, coco, laranja, limão, tangerina, feijão e milho (CINTRA; LIBARDI, 1998; REZENDE, 2000; JACOMINE, 2001).

Algumas das razões para o sucesso do cultivo agrícola nessa área dos Tabuleiros Costeiros é o relevo plano, sem grandes declividades, boa profundidade e drenagem dos solos, porém, uma problemática a ser superada para a melhoria da produtividade nessas áreas são os solos com a presença de horizonte com caráter coeso, que podem ocorrer no solo a partir de 0,22 metros de profundidade (LIMA NETO *et al.*, 2009).

Segundo Santos *et al.* (2018), caráter coeso é um atributo diagnóstico utilizado para designar um estado muito duro a extremante duro do solo quando seco, o qual quando úmido se torna friável ou firme.

Essas particularidades que existem nos horizontes com caráter coeso são atribuídas ao colapso estrutural que acontece naturalmente nesses solos, tornando a estrutura maciça e o solo, geralmente, adensado.

Os reflexos do adensamento são observados em atributos físicos do solo, tais como o aumento da densidade, diminuição da porosidade, por meio da redução da macroporosidade e aumento da microporosidade (REZENDE, 2000; RAMOS *et al.*, 2013), além da diminuição da permeabilidade intrínseca do solo ao ar (MENEZES *et al.*, 2018). Tais atributos influenciam fortemente o desenvolvimento das plantas quando cultivadas sobre esses solos, principalmente, quando associados à má distribuição das chuvas, uma vez que essas se concentram em alguns meses do ano (CINTRA; LIBARDI; SAAD, 2000).

No período chuvoso a infiltração tende a diminuir e há o acúmulo de água no horizonte com caráter coeso e acima dele. Nessa situação, podem ocorrer problemas relacionados à diminuição da aeração do solo, podendo afetar diretamente o desenvolvimento

do sistema radicular, trazendo consequências negativas para o desenvolvimento da planta. Quando as chuvas cessam, e o solo se torna seco, o desenvolvimento do sistema radicular é prejudicado pela dureza do solo, impedindo o aprofundamento do sistema radicular (REZENDE, 2000; GIAROLA; SILVA, 2002), além da maior dificuldade na absorção de água pela planta, visto que a água fica retida com maior energia no solo o que resulta, também, na diminuição do desenvolvimento das plantas.

Trabalhos com os horizontes com caráter coeso e o desenvolvimento de plantas são mais comuns relacionando a resistência à penetração com esse atributo diagnóstico e, normalmente, avaliando ou inferindo sobre o crescimento de raízes (REZENDE, 2000; SANTANA *et al.*, 2006). Entretanto, trabalhos que envolvam o desenvolvimento de plantas em solos com caráter coeso com umidade que ainda não tenha atingido a consistência muito dura a extremamente dura com variações na porosidade de aeração são inexistentes.

Diante do contexto, tem-se como hipótese que os horizontes com caráter coeso, na umidade que o solo ainda não atingiu a consistência muito dura a extremamente dura, podem apresentar porosidades de aeração que afetam o desenvolvimento de plantas de milho (*Zea mays*).

Desse modo, objetivou-se conhecer a influência do horizonte com caráter coeso, mantido em condições de umidade com diferentes porosidades de aeração no desenvolvimento de plantas de milho.

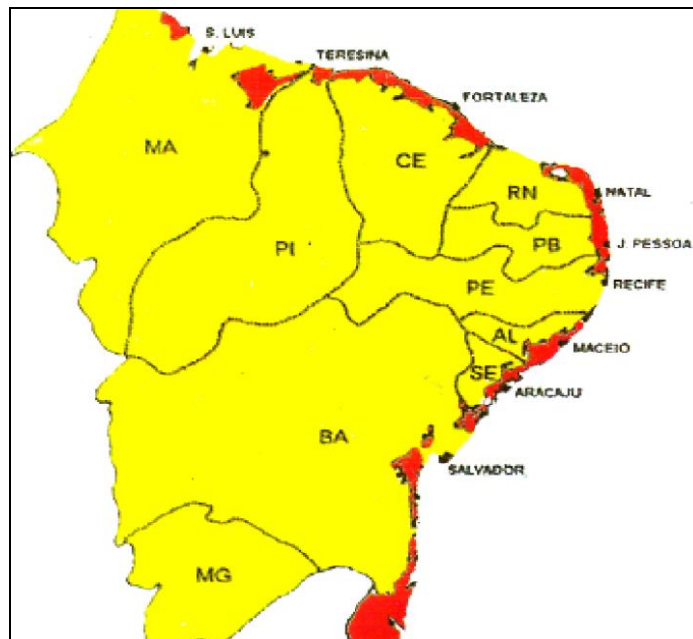
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Tabuleiros costeiros

Denominam-se Tabuleiros Costeiros um conjunto de formas de relevo de topo aplainado que apresentam altitudes, na maioria das vezes, baixas e têm a proximidade com a zona costeira (BRASIL, 1981; INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2009). Ocorrem em quase toda a faixa litorânea do Brasil com diferentes tipos climáticos (JACOMINE, 2001).

Essa unidade geomorfológica abrange uma extensa área que vai desde o estado do Amapá ao estado do Rio de Janeiro. No Nordeste, ocupam cerca de 10 milhões de hectares (SOUZA; SOUZA; CALDAS, 2001) e estão distribuídos nos Estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Maranhão e Piauí (FIGURA 1) (JACOMINE, 2001; DANTAS *et al.*, 2014; MARCELINO, 1999).

Figura 1 - Localização dos Tabuleiros Costeiros no Nordeste do Brasil



Fonte: Rezende (2000)

A ocorrência dos Tabuleiros Costeiros no Brasil tem relação com os depósitos sedimentares da Formação Barreiras de origem terrígena continental e posteriormente evidenciou-se a influência marinha (ARAI, 2006; NUNES; SILVA; VILAS-BOAS, 2011).

A gênese da Formação Barreiras e a atual configuração do litoral brasileiro estão relacionadas a diferentes ciclos de erosão e deposição de sedimentos continentais que

ocorreram devido à atuação de fatores ambientais distintos, especialmente mudanças climáticas (quando da alternância do clima árido ou semiárido e para o clima quente e úmido e vice versa), oscilações do nível do mar (transgressão e regressão marinhas) e movimentos tectônicos verticais, sem provocar dobras ou falhas (soerguimento epirogenético) durante o período de formação (ARAI, 2006; NUNES; SILVA; VILAS-BOAS, 2011; DUARTE, 2015).

Os Tabuleiros Costeiros apresentam uma feição característica que é a topografia tabular, de extensos topos planos, dissecados por vales profundos. Apresentam normalmente cotas altimétricas que variam de 70 a 100 m (MORAIS *et al.*, 2006; BRANDÃO; FREITAS, 2014).

No Ceará, os Tabuleiros Costeiros também ocupam áreas próximas ao litoral em uma faixa praticamente contínua. Na costa leste cearense, algumas vezes, atingem o litoral, formando falésias, e essas se estendem ao litoral do Rio Grande do Norte.

2.2 Solos dos tabuleiros costeiros

Os solos da região dos Tabuleiros Costeiros são formados a partir de sedimentos detríticos, siliciclásticos, mal selecionados, com predomínio de areia fina a grossa, constituída essencialmente de quartzo e tendo a caulinita como o tipo de argila predominante (NUNES; SILVA; VILAS-BOAS, 2011). Apresentam, normalmente, baixos os teores de Fe_2O_3 , predominando a goethita e os solos com cores amareladas (GIAROLA; SILVA, 2002).

Os solos originados nessa região são constituídos por poucas classes, sendo encontrados principalmente Latossolos e Argissolos Amarelos, os quais são normalmente amarelos, distróficos, com baixos teores de matéria orgânica, profundos ou moderadamente profundos, geralmente são bem drenados e porosos, e com a adoção de práticas corretivas possuem de médio a alto potencial agrícola (RIBEIRO, 2001; MORAIS *et al.*, 2006). Outras classes de solos também são localizadas nas regiões dos Tabuleiros em menor expressão, que são os casos dos Argissolos Acinzentados, Argissolos Vermelho-Amarelos, Latossolos Vermelho-Amarelos, Espodosolos, Neossolos Quartzarênicos e Plintossolos (JACOMINE, 2001; RIBEIRO, 2001; MOREAU *et al.*, 2006a; SOUZA; SOUZA; LEDO, 2007).

Os solos dos Tabuleiros Costeiros podem ter alguns de seus horizontes adensados e, em decorrência disso, apresentar um atributo diagnóstico denominado de caráter coeso. Na presença desse atributo, o solo demonstra ter consistência muito dura a extremante dura quando seco, e quando umedecido torna-se friável ou firme (SANTOS *et al.*, 2018).

O horizonte com caráter coeso ocorre de forma natural nesses solos e é considerado uma das principais limitações agrícolas dessa região, visto que a presença desse caráter no solo pode trazer prejuízos no crescimento e desenvolvimento tanto para plantas perenes quanto para plantas anuais (REZENDE, 2000; JACOMINE, 2001).

Para esses dois ciclos de planta, caso o horizonte com caráter coeso esteja localizado mais superficialmente, seja pela própria formação ou caso tenha acontecido a perda, por erosão, das camadas mais superficiais do solo, as plantas podem ter dificuldades de aprofundar o sistema radicular e conseqüentemente limitar a absorção de água e nutrientes. Além disso, nos dois casos, na presença desse caráter, as plantas podem sofrer danos pela dificuldade de difusão de gases no espaço poroso do solo quando esse último se encontrar com umidade elevada.

Em trabalhos de caracterização de solos com caráter coeso foi verificado que esse horizonte ocorre em profundidades que se estendem desde 0,22 até 1,42 metro de profundidade e com espessuras que variam de 20 cm até 90 cm (LIMA *et al.*, 2004; LIMA NETO *et al.*, 2009; VIEIRA *et al.*, 2012). No estado do Ceará, eles já foram descritos nos municípios de Fortaleza, Trairi, Pacajus, Aquiraz e Camocim (VIEIRA, 2013; LIMA, 2004).

2.3 Formação e ocorrência dos solos com caráter coeso

Quanto à formação dos solos com caráter coeso, principalmente, no que se refere aos processos envolvidos na gênese desses horizontes ainda não há um consenso por partes dos pesquisadores (GIAROLA; SILVA, 2002). Portanto, eles têm indicado diversos mecanismos para esclarecer a formação desse adensamento. Os principais mecanismos para explicar a gênese desses horizontes serão abordados a seguir.

Uma das hipóteses para a formação do caráter coeso é o processo denominado argiluviação com destaque para a translocação de argila muito fina. Nesse caso, há a perda de argilas menores que 0,0002 mm na forma de argila dispersa, das camadas superficiais para as camadas subjacentes ou dentro do mesmo horizonte. Ou seja, as argilas se depositariam nos poros do solo e formariam pontes entre os constituintes do solo, aumentando, assim, a coesão (GIAROLA; SILVA, 2002; CORRÊA *et al.*, 2008; BEZERRA *et al.*, 2014).

Outra vertente considera o ajuste face a face das placas de minerais da fração argila (caulinita) em escala microscópica e pela pouca expressão de óxidos de ferro e alumínio e matéria orgânica, potencializados pelos ciclos de umedecimento e secagem (MOREAU *et al.*, 2006b).

A formação desse caráter também é atribuída ao aumento da concentração de silício nesses horizontes. Nesta situação, ocorre a polimerização e precipitação na forma de sílica amorfa ou outros constituintes alumino-silicatos amorfos. Sendo que, o período seco favorece a precipitação desses compostos, aumentando a resistência à penetração das raízes e no período úmido ocorre a despolimerização da sílica, levando à friabilidade (ARAÚJO FILHO; CARVALHO; SILVA, 2001; VIEIRA *et al.*, 2012).

Outros pesquisadores afirmam que a origem desse horizonte adensado é devido aos próprios sedimentos de areia mal selecionados que são herdados do material de origem, em que os tamanhos de areia influenciam fortemente no adensamento (ABRAHÃO *et al.*, 1998; LIMA NETO *et al.*, 2010; BEZERRA *et al.*, 2014). Assim, é provável que esses fatores não ocorram de forma isolada, mas de forma conjunta para a manifestação do caráter coeso no solo.

Esse caráter ocorre tipicamente em horizontes subsuperficiais, normalmente no horizonte de transição AB e/ou BA, podendo prolongar-se até o Bw ou Bt. Tais horizontes apresentam baixos teores de ferro (óxido de ferro menor que 8%), a saturação por base é baixa e tem a caulinita como o argilomineral predominante (GIAROLA; SILVA, 2002).

2.4 Atributos físicos de solos com caráter coeso

O caráter coeso influencia fortemente a forma como as propriedades físicas do solo se manifestam no ecossistema. Diante disso, serão descritas algumas dessas propriedades importantes para os solos que apresentam esse caráter.

2.4.1 Densidade do solo

A densidade do solo é expressa como a razão entre a massa de sólidos e o volume total, ou seja, espaço poroso do solo é considerado. É um atributo importante, visto que infere sobre as mudanças que ocorrem no solo ao longo do tempo (AMARO FILHO; ASSIS JÚNIOR; MOTA, 2008). É possível verificar em diversos trabalhos acadêmicos que abordam sobre solos de caráter coeso que a densidade nesses horizontes é aumentada. Segundo Araújo Filho, Carvalho e Silva (2001), nos Latossolos e Argissolos, a densidade média nesse horizonte varia de 1,5 a 1,8 g cm⁻³.

É válido ressaltar que quando se trata de densidade do solo, deve-se sempre considerar a textura do solo analisado, visto que essa característica pode influenciar nos

valores de densidade encontrados e induzir a interpretações errôneas (SANTANA *et al.*, 2006). No estado do Ceará, no município de Trairí, Vieira *et al.* (2012) estudando Argissolos Amarelos e Acinzentados, encontraram valores de densidades de $1,67 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,73 \text{ g cm}^{-3}$, nas classes texturais Franco argilo arenosa e Franco arenosa, respectivamente.

Tal comportamento de densidade (mais altas nos horizontes com caráter coeso) ocorre devido aos processos naturais de formação desse caráter, como visto anteriormente. Esse fato reflete no desenvolvimento das plantas, pois o sistema radicular está diretamente em contato com o solo.

Nas camadas adensadas desses horizontes as raízes tendem a ficar mais superficializadas, o que pode ocasionar em prejuízos no desenvolvimento das raízes e, conseqüentemente na planta. Esse fato é atribuído aos altos valores de densidade, aumento da resistência do solo à penetração de raízes e à diminuição da quantidade de macroporos (REZENDE, 2000).

Santana *et al.* (2006) analisando sobre Latossolos que apresentavam o horizonte com caráter coeso no estado da Bahia, observaram diminuição da densidade de raízes de citrus com o aumento de densidade do solo. Nesse trabalho, no horizonte superficial, com densidade do solo de $1,43 \text{ g cm}^{-3}$, a densidade de raízes estava em torno de $0,9 \text{ cm}^{-3}$. Já no horizonte com caráter coeso, com densidade do solo de $1,56 \text{ g cm}^{-3}$, a densidade de raízes caiu para próximo de zero evidenciando a forte influência da camada coesa no desenvolvimento radicular.

2.4.2 Porosidade total, macro e microporosidade

A porosidade total mensura a fração do volume do solo ocupado por poros (LIBARDI, 2005). Essa fração volumétrica é ocupada pelo ar e pela água, sendo que o ar e a água nos poros estão intimamente relacionados, de forma que quando aumenta um diminui o outro (HILLEL, 1998).

Esse parâmetro é influenciado pela textura e pela forma como as partículas primárias estão arrançadas, sendo que quando estão em íntimo contato, os sólidos predominam na amostra e a porosidade total é baixa. Ao passo que quando essas partículas não estão em contato íntimo, ou seja, estão agregadas, ocorre a formação de poros e a porosidade total é aumentada (RIBEIRO *et al.*, 2007).

O espaço poroso interfere na aeração do solo, na condução e retenção de água, na resistência do solo à penetração de raízes. Portanto, para que as culturas possam crescer de

forma adequada é importante que esse espaço poroso permita a entrada de ar e possibilite o movimento e a retenção de água nos poros do solo (HILLEL, 1998), além de não restringir o crescimento do sistema radicular.

É importante notar que apenas saber sobre porosidade total não é suficiente para avaliar o comportamento de um determinado solo em termos de porosidade. Além da porosidade total, para se ter inferências mais assertivas de um dado solo e sua influência sobre a planta, é relevante saber sobre a distribuição de poros por tamanho (AMARO FILHO; ASSIS; MOTA, 2008).

Existem inúmeras classificações de tamanho de poros na literatura. Uma delas divide os poros em duas categorias principais: macroporos e microporos, sendo que o limite de separação entre elas é o diâmetro de 0,05 mm (KOOEVAAR; MENELIK; KIRKSEN, 1983).

Em relação às funções dos poros no solo, os macroporos são responsáveis pela infiltração, rápida redistribuição de água, acomodação das raízes de plantas e inúmeros animais que habitam o solo, e ainda permitem a movimentação livre do ar, ou seja, afetam o processo de aeração do solo (BRADY, 2013).

O processo de aeração acontece pela troca de gases do solo com a atmosfera. A composição química do ar do solo é semelhante à atmosfera livre, entretanto, os teores de oxigênio (O_2) e gás carbônico (CO_2) podem apresentar diferenças significativas, pois microrganismos e as raízes das plantas consomem o oxigênio do ar do solo, e, dessa forma, a concentração desse gás é menor no solo que na atmosfera livre. Em relação ao gás carbônico, sua concentração é maior no ar do solo que na atmosfera livre, pois esse gás é produzido durante os processos metabólicos dos organismos do solo, o que provoca o aumento da sua concentração (REICHARDT, 2012).

Para o crescimento adequado das raízes, a quantidade e as trocas de CO_2 e O_2 do ar do solo com a atmosfera devem ser feitas em proporções e velocidade adequadas, de modo que não falte oxigênio para a respiração das raízes e não acumule CO_2 na zona radicular (REICHARDT, 2012). As trocas gasosas no solo acontecem sobretudo nos poros livres de água, ou seja, principalmente na macroporosidade.

Os microporos, também chamados de poros capilares, atuam no armazenamento de água. Esses últimos se esvaziam lentamente, logo a movimentação da água no solo também é lenta. Quando a água fica retida em poros muito pequenos, ela se torna indisponível para as plantas (BRADY, 2013).

Solos com comprometimento em sua estrutura tendem a ter os microporos em maior quantidade em relação ao volume de poros total, ocorrendo a movimentação da água e do ar de forma mais lenta (BRADY, 2013). Nesse caso, podem-se enquadrar os solos com caráter coeso. Nesses horizontes, devido aos processos de adensamento, normalmente, acontece diminuição da macroporosidade e o predomínio da microporosidade (LIMA *et al.*, 2005).

Em trabalho realizado por Mota *et al.* (2018), em um Argissolo Vermelho-Amarelo e outro Argissolo Amarelo, que continham o caráter coeso, fez-se a comparação de horizontes com e sem caráter coeso e os autores encontraram menores valores de porosidade total em relação aos horizontes não coesos, nos dois solos.

Cintra, Portela e Nogueira (2004), estudando um perfil de solo (separados em cinco camadas) em que havia uma delas que expressava o caráter coeso, e fazendo a comparação entre elas, verificaram a diminuição da porosidade total e da macroporosidade na camada coesa em relação às outras camadas estudadas.

Tais características dos horizontes com caráter coeso dificultam o movimento da água e do ar e facilita a formação de zonas de saturação no próprio horizonte coeso ou acima dele, o qual favorece condições restritivas para a respiração celular e prejudica o desenvolvimento das culturas (LIBARDI; MELO FILHO, 2011).

2.4.3 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar e índice de continuidade de poros

A permeabilidade intrínseca do solo ao ar (Kar) pode ser definida como a habilidade que o solo tem em permitir a passagem do ar através de seus poros (LAL, 2000). Diversos fatores afetam essa propriedade, tais como o espaço poroso, os tipos de tamanho e a continuidade de poros e o conteúdo volumétrico de água no solo (WANG *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2009).

Esse atributo, por estar intimamente relacionado ao espaço poroso do solo, pode ser usado para depreender sobre modificações na estrutura do solo causado por diferentes práticas de manejo (SILVEIRA JÚNIOR *et al.*, 2012) ou modificações causadas pela própria gênese do solo, como é o caso dos solos que apresentam o caráter coeso.

Silveira Júnior *et al.* (2012) investigando três sistemas de manejo, em que a compactação era uma problemática a ser resolvida (plantio direto, plantio direto com escarificação mecânica e plantio direto com descompactação biológica), observaram que no sistema de manejo que apresentou maior macroporosidade, a permeabilidade intrínseca do

solo ao ar também foi maior. Observaram também que à medida que ocorria o secamento do solo, a permeabilidade aumentava. Isso evidencia que a permeabilidade é bastante dependente da macroporosidade e do conteúdo de água no solo.

Silva *et al.* (2009) também confirmaram em seus resultados que a permeabilidade ao ar tem relação inversa com o conteúdo de água do solo, pois à medida que a proporção de poros com ar aumentava, também crescia a área disponível ao fluxo de ar.

No caso dos horizontes com caráter coeso, pelo fato da microporosidade ser maior em relação à macroporosidade (LIMA *et al.*, 2005) é natural que a permeabilidade, nesses horizontes, seja diminuída. Mota *et al.* (2018) trabalhando com solos que apresentavam o caráter coeso e não coeso, verificaram menor volume de macroporos nos horizontes que apresentavam o caráter coeso, em virtude da maior coesão das partículas do solo, a qual ocasiona modificação e redução do espaço poroso, alterando o tamanho de poros (principalmente macroporos).

Menezes *et al.* (2018) avaliando horizontes com e sem caráter coeso em dois Argissolos, verificaram que os horizontes que possuíam o caráter coeso, manifestavam menor Kar em relação aos horizontes não coeso, devido ao empacotamento cerrado das partículas do solo nesses horizontes. É válido ressaltar que mesmo com baixos valores de Kar encontrados, esses foram superiores a $1,0 \mu\text{m}^2$.

Esse valor é considerado crítico para essa variável, ou seja, caso a Kar atinja valores inferiores a $1,0 \mu\text{m}^2$, considera-se que os poros responsáveis pelas trocas gasosas estão bloqueados e não contribuem para o referido processo (MCQUEEN; SHEPHERD, 2002).

Para avaliar se a permeabilidade intrínseca do solo ao ar é atribuída à porosidade de aeração ou se é decorrente de outros aspectos que envolvam a forma como o espaço poroso está arranjado, tais como a tortuosidade e continuidade de poros, alguns índices são utilizados, entre eles está o K1, que considera a permeabilidade intrínseca do solo ao ar e a porosidade de aeração (log de Kar/porosidade de aeração) (GROENEVELT; KAY; GRANT, 1984).

Quando se obtém maiores valores de K1, infere-se que o solo também tem maior capacidade de promover o fluxo de ar devido a maior continuidade ou menor tortuosidade do sistema poroso (GUEDES FILHO *et al.*, 2015). Porém, quando o solo apresenta resultados de K1 similares, com diferentes valores de Kar, depreende-se que aconteça semelhante distribuição e continuidade de poros (GROENEVELT; KAY; GRANT, 1984).

No trabalho realizado por Menezes (2016), avaliando este índice no Argissolo Vermelho-Amarelo (classe textural franco-argiloarenosa) e outro Argissolo Amarelo (classe

textural franco-arenosa), foram identificados maiores valores de K1 no Argissolo Vermelho-Amarelo, sendo que esses maiores valores encontrados foram atribuídos à estrutura do solo e à textura do horizonte em questão.

2.5 Desenvolvimento de plantas em solos com caráter coeso

Os solos com caráter coeso têm como uma de suas principais características o arranjo cerrado das partículas e, com isso, aumenta a coesão entre as partículas de solo. Tal característica influencia o espaço poroso do solo e traz prejuízos para os processos de trocas gasosas, para o fluxo de água e nutrientes e para o desenvolvimento de microrganismos e o sistema radicular das plantas (REZENDE, 2000).

Dependendo do conteúdo de água nesses horizontes essa problemática é intensificada e as plantas podem ter seu crescimento limitado. Solos coesos mais secos tendem a ter problemas relacionados à maior resistência à penetração das raízes e solos mais úmidos têm mais chances de ter problemas relacionados ao processo de aeração (GIAROLA; SILVA, 2002).

Em solos com restrição nos processos de trocas gasosas, a baixa concentração do oxigênio afeta fortemente o desenvolvimento das plantas. Rezende (2000) afirma que existe uma correlação positiva entre o aprofundamento do sistema radicular e a taxa de difusão de oxigênio.

No caso da presença de camadas adensadas, como é o caso dos solos com caráter coeso, situações de hipóxia ou anoxia são facilmente encontradas e, nessas situações, a difusão do oxigênio é muito dificultada (REZENDE, 2000). Em temperaturas acima de 20 °C as raízes, a fauna do solo e microrganismos consomem de forma mais acelerada o oxigênio do solo acarretando, mais rapidamente, à situação de déficit de oxigênio. Situações de hipóxia ou anoxia danificam as raízes por prejudicar o processo de respiração celular (TAIZ; ZAIGER, 2013).

A respiração celular aeróbia é um processo biológico no qual compostos de carbono reduzidos são transportados para os sítios de respiração e lá oxidados de maneira controlada. Durante esse processo, ocorre a síntese de compostos energéticos, o Adenosina trifosfato (ATP), o qual é utilizado pelas células para a manutenção e desenvolvimento do vegetal (TAIZ; ZAIGER, 2013).

Na respiração aeróbia a glicose é quebrada e utilizada para a síntese dos compostos energéticos. Entretanto, para que esse processo aconteça, a presença do oxigênio é

primordial, pois o mesmo atua na última etapa do processo respiratório, como acceptor final de elétrons, nas cristas mitocondriais. Caso não haja presença desse elemento, todas as etapas anteriores são paralisadas e a respiração é comprometida (TAIZ; ZAIGER, 2013; KERBAUY, 2013).

Na falta de oxigênio no solo e, conseqüentemente nas raízes, para ser utilizado nas mitocôndrias, a respiração passa de aeróbia para anaeróbia, ou seja, ocorre produção de compostos energéticos sem a presença do oxigênio. Essa nova rota metabólica é denominada fermentação (KERBAUY, 2013).

A grande diferença entre esses dois tipos de processos respiratórios se dá, principalmente, pela diferença de produção de ATP, pois na respiração aeróbia, a produção de energia é muito maior que na fermentação. Ademais, na respiração anaeróbia existe a produção de compostos que podem degradar as membranas, como o lactato e etanol (KERBAUY, 2013).

Barley (1962 apud REZENDE, 2000) afirma que a concentração de oxigênio determina a taxa de crescimento de raízes apenas quando a resistência à penetração das raízes é baixa também. Contudo, quando a resistência se torna alta, independente de qual for a concentração de oxigênio, as plantas não conseguem se desenvolver.

Silveira *et al.* (2010), trabalhando em um Argissolo Amarelo distrocoeso, avaliaram a resistência à penetração das raízes na capacidade de campo (10 kPa), encontraram resistência maior que 2,5 MPa. Os autores consideraram esse valor alto e inferiram que poderiam ocorrer limitações no desenvolvimento das raízes das plantas.

Menezes (2016) avaliando a resistência à penetração na tensão de 10 kPa, em solo com caráter coeso, de textura franco-argiloarenosa, obteve resistência de 2,7 MPa. O autor sugere que conteúdos de argila iguais ou maiores que 25% já seriam suficientes para causar restrições à penetração das raízes, se considerar o valor crítico de 2 MPa.

As altas resistências à penetração das raízes encontradas nos horizontes com caráter coeso levam à superficialização das raízes, sendo que a maioria delas tende a se concentrar nos horizontes superficiais, portanto, ficam mais susceptíveis a terem prejuízos relacionados à absorção de água (CINTRA *et al.*, 2009). Ademais, maiores prejuízos serão manifestados à medida que esse horizonte está mais próximo à superfície do solo, pois um menor volume de solo fica disponível para a exploração do sistema radicular (REZENDE, 2000; CINTRA; PORTELA; NOGUEIRA, 2004; LIMA NETO *et al.*, 2009).

Esses fatores abióticos estressantes além de afetarem o desenvolvimento das raízes, trazem, em geral, consequências bioquímicas e fisiológicas negativas para as plantas como um todo (TAIZ; ZAIGER, 2013).

Sob déficit de oxigênio, o transporte de água da raiz para a parte aérea pode ser diminuído (YORDANOVA; POPOVA, 2007), limitado, principalmente, pela ineficiência dos canais específicos para a passagem de água, denominados aquaporinas (SAUTER, 2013); e o transporte de carboidratos da parte aérea para a raiz também pode ser afetado (YORDANOVA; POPOVA, 2007), esse, no entanto, limitado por causas difusionais ou de ordem bioquímica ligadas, especialmente, com a atividade da enzima Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase, a rubisco (PEZESHKI, 2001), que reflete na diminuição da taxa fotossintética.

Além disso, os solos que apresentam o caráter coeso têm a tendência de reter água com maior energia, o que pode dificultar a absorção de água pela planta, fazendo, dessa forma, que ocorram situações de déficit hídrico e, dependendo da intensidade desse estresse, a planta responde de forma diferente. No estresse hídrico leve, normalmente ocorre a diminuição da abertura estomática, diminuindo a entrada de CO₂ para a câmara subestomática e, com o progressivo aumento do déficit hídrico, a quantidade de CO₂ na câmara subestomática aumenta, indicando restrições ligadas ao aparato fotossintético. Nesse caso, problemas relacionados à atividade da enzima rubisco, com a taxa de transporte de elétrons e eficiência do fotossistema II são relatados. Em todos os casos, queda na taxa fotossintética é observada (CIFRE *et al.*, 2005).

2.6 A cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) é um cereal da família Gramineae/Poaceae com folhas lineares e sistema radicular fasciculado (MAGALHÃES *et al.*, 2002; FONTANELI; SANTOS; FONTANELI, 2009), com a profundidade efetiva que varia entre 0,40 e 0,50 m (ALBUQUERQUE; RESENDE, 2002; BORDIN *et al.*, 2008). Rodrigues *et al.* (2017) pesquisando sobre o milho safrinha, encontraram profundidade máxima do sistema radicular em torno de 1 m.

Magalhães, Duraes e Gomide (1996) afirmam que em solos profundos, o sistema radicular do milho pode chegar até uma profundidade de 2 m, porém, a maior parte das ramificações das raízes localiza-se nos 40 a 60 cm de profundidade e aproximadamente 80% da absorção de água ocorre dentro dessa camada.

Entretanto, a presença de camadas compactadas ou adensadas altera o crescimento das raízes. Foloni, Calonego e Lima (2003), analisando a cultura do milho, com diferentes níveis de compactação observaram que camadas mais compactadas diminuem o crescimento e alteram a distribuição das raízes do milho ao longo do perfil do solo, e essas modificações estão associadas à resistência do solo à penetração das raízes.

Ainda segundo Foloni, Calonego e Lima (2003), a resistência à penetração de 1,4 MPa impede que o sistema radicular do milho penetre na camada compactada, prejudicando, assim, o seu desenvolvimento em profundidade, porém a produção de raízes total não foi diminuída.

A superficialização do sistema radicular diminui a área de exploração do sistema radicular da cultura, o que pode resultar na diminuição da absorção de água, e consequentemente o estresse hídrico na planta.

Em casos de estresse hídrico na planta, há possibilidade de existir problemas na absorção de nutrientes, visto que a água serve como veículo para a absorção de nutrientes (RUIZ; MIRANDA; CONCEIÇÃO, 1999). Diante dessa situação, os mecanismos de absorção de nutrientes como fluxo de massa e difusão podem ser prejudicados (RAIJ, 2011).

Uma outra problemática enfrentada no cultivo da cultura do milho nos solos que apresentam o caráter coeso são os prejuízos para o crescimento da planta advindos do comprometimento dos processos de trocas gasosas na zona radicular. Nesse contexto, as características inerentes quanto a essa condição de solo coeso (baixa porosidade total, baixa macroporosidade e alta microporosidade) favorecem a formação de zonas saturadas, uma vez que o movimento da água é restringido nesse horizonte; portanto, problemas relacionados à respiração celular acontecem e refletem adversamente no crescimento das culturas (LIBARDI; MELO FILHO, 2001).

Coelho *et al.* (2013) ao analisarem plantas de milho, com e sem déficit de oxigênio no solo observaram a diminuição do conteúdo relativo de água na folha, além da redução do crescimento das plantas no tratamento com déficit de oxigênio.

Grzesiak *et al.* (1999) estudando dois híbridos de milho, em condições de seca e de déficit de oxigênio em relação à condição do solo na capacidade de campo (controle), observaram menor número de ramificações laterais e menos matéria seca nos dois tratamentos de estresse em relação às plantas cultivadas em condição controle. Sendo que o efeito mais prejudicial no crescimento da raiz foi o tratamento em que a planta foi exposta ao déficit de oxigênio.

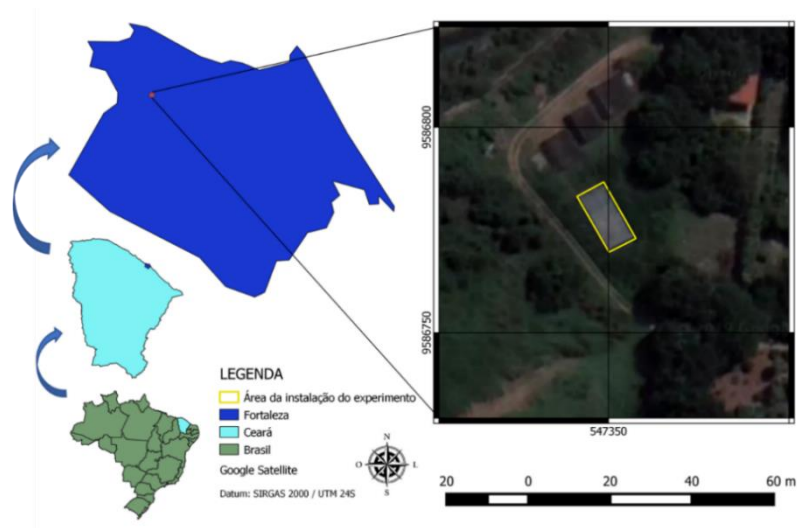
Isso posto, percebe-se que de acordo com os estresses ambientais que a planta do milho é exposta, os aspectos vegetativos e reprodutivos podem ser modificados, refletindo em diferentes respostas na ontogenia do desenvolvimento da planta (MAGALHÃES *et al.*, 2002; FONTANELI; SANTOS; FONTANELI, 2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no município de Fortaleza - CE, na Universidade Federal do Ceará (UFC), no Núcleo de Ensino, Extensão e Pesquisa em Agricultura Urbana (NEPAU)/ UFC, Campus do Pici (coordenada N 9.856.790m, E 547.351m e UTM Zona 24S) (FIGURA 2), em uma área coberta com plástico transparente (FIGURA 3), para evitar a adição de água por precipitação pluvial, no período de junho de 2018 a agosto de 2018.

Figura 2 - Localização da área experimental



Fonte: Eurileny Almeida, em 2019.

Figura 3 - Vista da área experimental



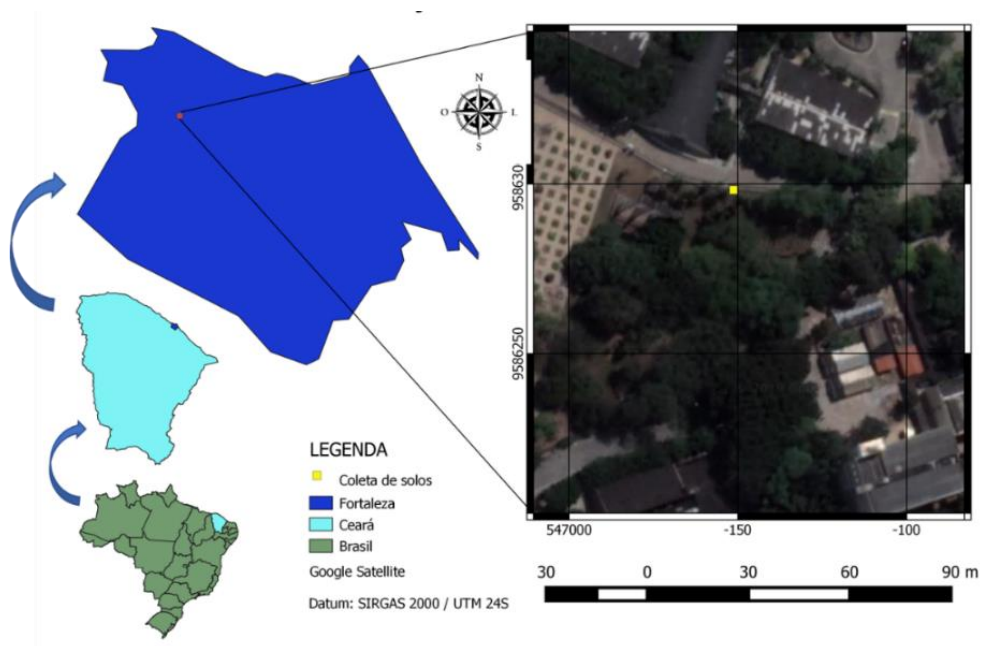
Fonte: Elaborada pela autora

3.2 Coleta e caracterização do solo utilizado

3.2.1 Coleta do solo

O solo foi coletado em uma trincheira, já aberta, no Campus do Pici, no Setor de Zootecnia (coordenada N 9.856.297m, E 547.050m e UTM Zona 24S) (FIGURA 4). O solo utilizado para a condução do experimento foi previamente classificado por Vieira (2013) como ARGISSOLO AMARELO. O *solum* possui mais de 187 cm de profundidade, onde o horizonte A vai de 0 a 17cm. O horizonte diagnóstico B textural vai de 63 a 187 cm+, em que o horizonte com caráter coeso aparece em uma profundidade de 79 a 152 cm a partir da superfície do solo.

Figura 4 - Localização da área onde ocorreu a coleta de solo

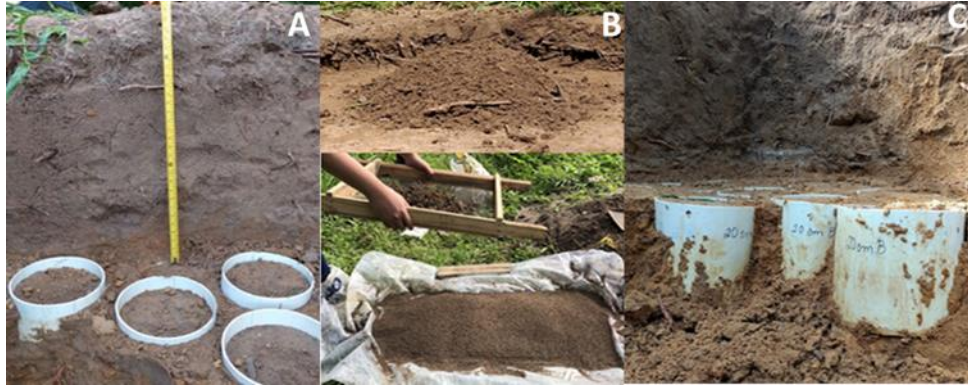


Fonte: Eurileny Almeida, em 2019.

Em relação à coleta de solo (FIGURA 5A), o horizonte A (0 a 17 cm) foi retirado, peneirado no campo para retirar o excesso de material grosseiro e posteriormente seco ao ar, destorroado e passado em peneira de malha de 2,0 mm de diâmetro (terra fina seca ao ar - TFSA) (FIGURA 5B). A coleta do solo do horizonte B com caráter coeso (79 a 152 cm) foi feita de forma a manter a estrutura indeformada. Para tanto, tubos de Policloreto de Vinil (PVC) de 20 cm de diâmetro e 20 cm de altura foram utilizados e as amostras coletadas diretamente no campo (FIGURA 5C).

Para esta coleta, o local onde o solo retirado foi anteriormente umedecido para facilitar a penetração dos canos. Em seguida, tubos foram, aos poucos, introduzidos no solo com o intuito de causar a menor perturbação possível em sua estrutura.

Figura 5 - Vista geral da coleta do solo (A); coleta do solo do horizonte A (B); coleta do solo do horizonte B com caráter coeso (C)



Fonte: Elaborado pela autora

3.2.2 Caracterização química do solo

Para a caracterização química, amostras deformadas foram coletadas e foi obtida a TFSA. Após isso, foram realizadas as análises químicas de acordo com a metodologia de Silva (2009) conforme Tabela 1 a seguir.

Tabela 1- Caracterização química do horizonte A e horizonte B com caráter coeso

	Horizonte	
	A	B
CE (dS m ⁻¹)	0,38	0,25
pH (Água)	5,27	4,61
P (mg.kg ⁻¹)	5,29	0,50
Ca ²⁺ (cmolc.kg ⁻¹)	1,2	0,80
Mg ²⁺ (cmolc.kg ⁻¹)	0,50	0,70
K ⁺ (cmolc.kg ⁻¹)	0,07	0,03
Na ⁺ (cmolc.kg ⁻¹)	0,06	0,08
Al ³⁺ (cmolc.kg ⁻¹)	0,10	0,45
H ⁺ (cmolc.kg ⁻¹)	2,06	2,05
SB ¹ (cmolc.kg ⁻¹)	1,83	1,61
T ² (cmolc.kg ⁻¹)	3,99	4,11
V ³ (%)	46	39
C (g.kg ⁻¹)	4,47	1,11

Fonte: Elaborado pela autora

SB: Soma de bases; T: CTC a pH 7; V: Saturação por bases

3.2.3 Caracterização física do solo

3.2.3.1 Granulometria, argila natural, classe textural e densidade de partículas

Para as análises físicas de granulometria, argila natural e densidade de partículas do solo, amostras deformadas foram coletadas e a TFSA preparada. Para a análise granulométrica utilizou-se o NaOH como dispersante químico das partículas e para a dispersão física foi utilizado um agitador elétrico. A areia foi quantificada por peneiramento, a argila foi determinada pelo método da pipeta e por diferença se obteve o silte (GEE; BAUDER, 1986); para a argila natural seguiu-se o mesmo procedimento utilizado na granulometria, com exceção de não utilizar o agente químico como dispersante.

A densidade de partículas foi feita pelo método do balão volumétrico. Para isso, 20 g de terra fina seca em estufa foram utilizadas e o volume de álcool etílico utilizado para preencher um balão volumétrico de 50 ml foi quantificado (BLAKE; HARTGE, 1986b).

O fracionamento da areia foi feito segundo a classificação granulométrica do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). Assim, as seguintes distribuições de areia por tamanho foram adotadas: Muito grossa (2,00-1,00 mm); Grossa (1,00-0,50 mm); Média (0,50- 0, 25 mm); Fina (0,25- 0, 10 mm); Muito fina (<0,10 - 0, 05 mm); a classificação textural foi realizada segundo Santos *et al.* (2018). A caracterização física é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Características físicas do solo (granulometria, argila natural (AN), classe textural e densidade de partículas).

Horiz.	Granulometria							Argila	AN	Classe textural	Densidade de partículas
	Areia					Silte	Total				
cm	MG	G	M	F	MF	Total	g kg ⁻¹				
A (0-17)	14	91	220	414	77	816	93	91	4	Areia Franca	2,52
B (79-152)	7	48	151	288	62	556	77	367	19	Argilosa	2,47

Fonte: Elaborado pela autora

MG: muito grossa (2,00-1,00 mm); G: grossa (1,00-0,50 mm); M: média (0,50- 0, 25 mm); F: fina (0,25- 0, 10 mm); e MF: muito fina (<0,10 - 0, 05 mm)

3.2.3.2 Resistência do solo à penetração

Foi determinada em amostras com estrutura preservada do horizonte B com caráter coeso, com teor de água correspondente ao potencial mátrico de -10 kPa (TABELA 3). Para tanto, foi utilizado um penetrômetro eletrônico estático de bancada equipado com atuador linear de célula de carga de 20 kgf, vinculado a um microcomputador para obtenção dos dados. A velocidade de penetração da haste foi de 1 cm min⁻¹ até atingir a profundidade de 4 cm. As leituras obtidas da superfície da amostra até 1,0 cm de profundidade foram descartadas, visto que a resistência inicialmente aumenta e após determinada profundidade, tende a ficar constante (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

Tabela 3 - Resistência à penetração no horizonte B com caráter coeso na tensão de 10 kPa

Horizonte	Resistência à penetração (MPa)
B com caráter coeso	1.8

Fonte: Elaborado pela autora

3.2.3.3 Curva característica de retenção de água no solo

Foram feitas duas curvas características de retenção de água no solo (CCRAS), uma para o horizonte A e outra para o horizonte B com caráter coeso.

Para a confecção de tais curvas, as amostras do horizonte A (deformada) foram preparadas em laboratório, com TFSA, e fixando valor da densidade de 1,4 g cm⁻³ (densidade do horizonte A previamente determinada), calculou-se a massa necessária para o preenchimento do cilindro de acordo com a equação 1.

$$d = \frac{m}{v} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que: d = densidade do solo (g cm⁻³); m= massa do solo (g); v= volume do cilindro (cm⁻³).

Porém, com as ressaturações no momento da construção da curva, a densidade obtida no final foi de 1,36 g cm⁻³.

As amostras para o preparo da curva do horizonte B com caráter coeso foram coletadas diretamente no campo, mantendo sua estrutura preservada. Para a coleta das amostras foi utilizado um trado do tipo Uhland.

As tensões utilizadas no preparo da curva foram: 0, 2, 4, 6, 8, 10, 33, 100, 700 e 1500 kPa. O conteúdo de água na saturação foi considerado igual à porosidade do solo. Para atingir o equilíbrio entre a tensão aplicada e o conteúdo de água nas menores tensões (0, 2, 6 e 10 kPa), foi utilizada a mesa de tensão (FIGURA 6A) e para as tensões maiores (33, 100, 700 e 1500 kPa) foi empregado o extrator de placa porosa de Richards (FIGURA 6B) (KLUTE, 1986).

Figura 6 - Mesa de tensão (A) e extrator de Richards (B) usados para a confecção das curvas característica de retenção de água no solo (CCRAS)



Fonte: Elaborado pela autora

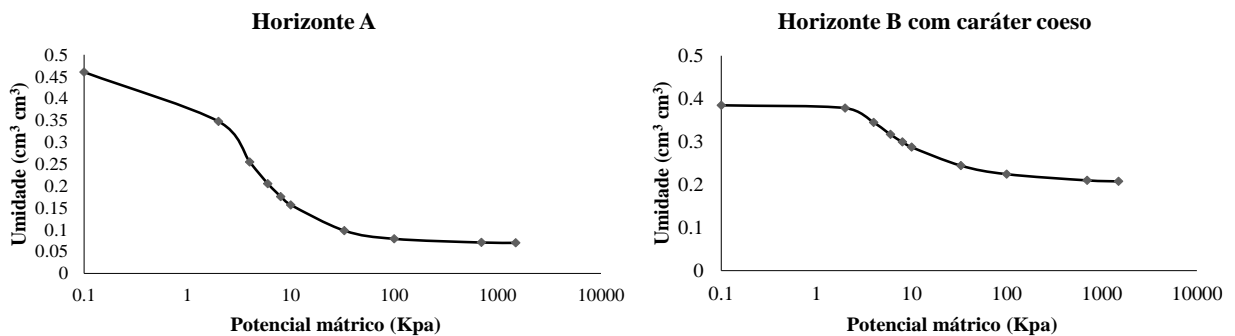
Após a obtenção de todas as umidades e nas suas respectivas tensões, o ajuste da curva foi feito pelo modelo matemático proposto por Genuchten (1980), a partir da equação 2:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\phi_m|)^n]^m}, \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que, θ corresponde ao conteúdo de água ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_r e θ_s são, respectivamente, os teores de água residual e de saturação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), ϕ_m o potencial mátrico da água no solo (kPa), α um escalonador do ϕ_m ; m e n são parâmetros de ajuste do modelo relacionados ao formato da curva.

Para o ajuste dos dados, foi utilizado o programa Table Curve 2D, versão 5.01 (TABLE CURVE 2D, 2014), sendo as variáveis θ_s e θ_r fixadas com valores, respectivamente, de conteúdo de água no solo correspondente à saturação e à tensão de 1500 kPa, ambos mensurados em laboratório. Como era de se esperar, as curvas apresentaram padrões diferentes entre os horizontes analisados (FIGURA 7).

Figura 7 - Curva característica de retenção de água no solo para o horizonte A, e o horizonte B com caráter coeso



Fonte: Elaborado pela autora

Os valores dos parâmetros de ajuste (α , m e n) e θ_r e θ_s da equação de van Genuchten para os horizontes A e B com caráter coeso encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores dos parâmetros de ajuste (α , m , n) e θ_r e θ_s da equação de van Genuchten (1980) para os horizontes A e B com caráter coeso

Horizontes	Parâmetros				
	α (1/kPa)	m -	n -	θ_s -----($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)-----	θ_r
Horizonte A	0,4562	0,5525	1,7406	0,4604	0,0699
Horizonte B	0,3580	0,1531	3,9466	0,3849	0,2075

Fonte: Elaborado pela autora

3.2.3.4 Densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade

A densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade foram determinadas e estão apresentadas na Tabela 5.

Para a densidade do solo foram coletadas amostras em cilindros de volume conhecido e em seguida, as amostras foram secas a 105°C até massa constante (BLAKE; HARTGE, 1986a).

A porosidade total do solo foi obtida de acordo com a equação 3:

$$PT = 1 - \rho_{\text{solo}} / \rho_{\text{partículas}} \quad \text{Eq. (3)}$$

Sendo: PT a porosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); ρ_{solo} e $\rho_{\text{partículas}}$: densidades do solo e de partículas (g cm^{-3}), respectivamente.

A microporosidade foi determinada pelo método da mesa de tensão. Logo, foi aplicada a tensão de 6 kPa no funil de Haines até que a água que ocupava os macroporos fosse drenada (DANIELSON; SUTHERLAND, 1986). A macroporosidade foi determinada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

Tabela 5 - Valores de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do horizonte A e horizonte B com caráter coeso

Horizonte	Atributos Físicos			
	Densidade do solo g cm^{-3}	Porosidade total $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Macroporosidade $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Microporosidade $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
Horizonte A	1,36	0,460	0,255	0,205
Horizonte B	1,52	0,385	0,068	0,317

Fonte: Elaborado pela autora

3.3 Tratamentos e delineamento experimental

Foram estabelecidas as porosidades de aeração de 0,04; 0,06; 0,09; 0,11 e 0,13 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Essas porosidades de aeração permitiam o solo com caráter coeso não atingir a consistência dura a extremante dura, a qual já é considerada na literatura, uma condição limitante para o desenvolvimento das raízes da planta. Para tanto, testes prévios de consistência foram feitos para assegurar que essas porosidades de aeração não atingiam a consistência dura a extremante dura.

Para a aplicação dessas porosidades de aeração, a partir da curva característica de água no solo, foi determinada a umidade na qual se permita ter 0,04; 0,06; 0,09; 0,11 e 0,13

$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de poros livres de água da porosidade total. Posteriormente, foi obtido o potencial matricial e a altura da coluna de mercúrio para cada tratamento.

O delineamento utilizado no experimento foi de blocos casualizados com cinco porosidades de aeração e seis repetições totalizando trinta unidades experimentais (FIGURAS 8 e 9), em que cada unidade experimental foi composta de uma planta por vaso.

Figura 8 - Croqui do experimento

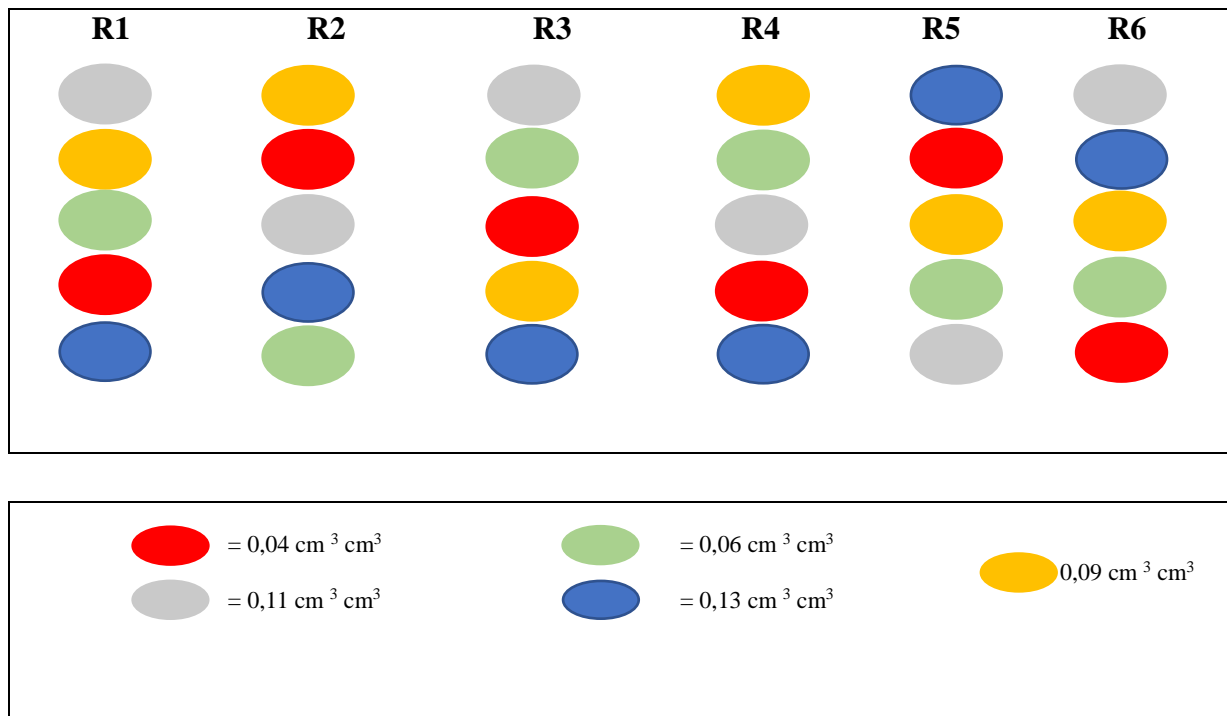


Figura 9 - Vista geral das unidades experimentais



Fonte: Elaborado pela autora

3.4 Montagem e condução do experimento

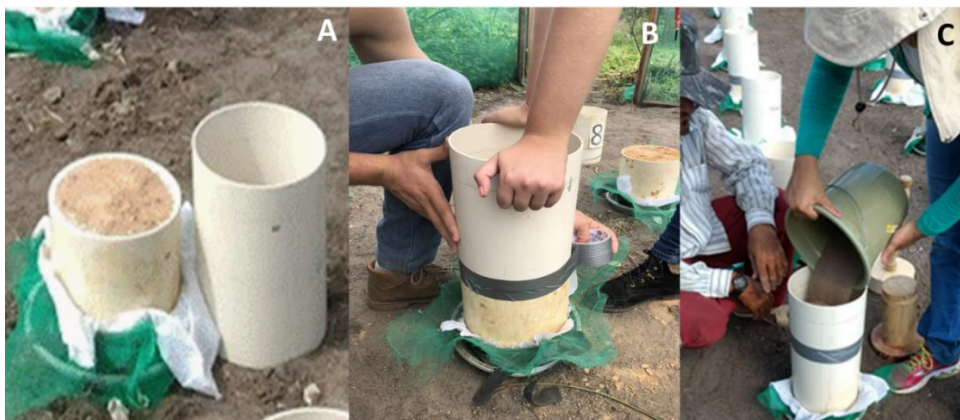
As colunas de solo foram montadas na área experimental. Para tanto, tubos de PVC foram utilizados, sendo que a coluna do horizonte A possuía altura de 20 cm e o horizonte B com caráter coeso também possuía 20 cm (para simular a ocorrência do caráter coeso ocorrendo mais superficialmente), totalizando uma altura de 40 cm, com 20 cm de diâmetro. Para a montagem da coluna de 40 cm, uma fita adesiva de alto poder aderente foi utilizada para fixar a coluna do horizonte A sobre a coluna do horizonte B (FIGURA 10B). Na parte inferior do horizonte B, em cada coluna, foi colocado um pano tipo morim, uma tela antiafídeos e um prato de plástico com o objetivo de evitar perdas de solo (FIGURA 10A).

A terra com o horizonte A (deformada) foi, anteriormente, preparada em laboratório (TFSA). Após, foi fixado o valor da densidade de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ (densidade do horizonte A previamente determinada) e calculou-se a massa necessária para preenchimento dessa camada (FIGURA 10C). Assim, utilizou-se a relação de densidade: massa do solo seco e volume total (Equação 4).

$$m = d * v \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que: m = massa do solo (g); d = densidade do solo (g cm^{-3}); v = volume do cilindro (cm^3).

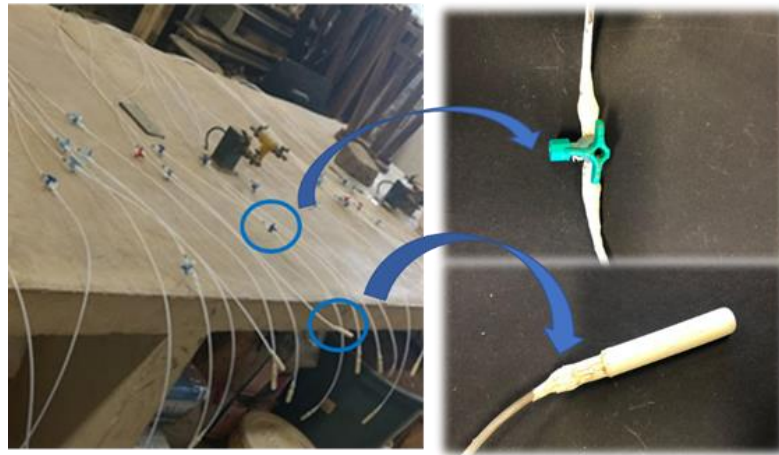
Figura 10 - Camada de solo do horizonte B com caráter coeso (A); Montagem da camada de solo do horizonte A sobre a camada do B (B); Preenchimento da camada de solo do horizonte A (C)



Fonte: Elaborado pela autora

Para o controle da irrigação foram confeccionados tensiômetros com manômetro de mercúrio; para tanto, cápsulas de cerâmica com 5 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro foram fixadas em uma mangueira de náilon, comumente denominada de espaguete, além da adaptação de uma torneira de três vias para a fluxagem do sistema (FIGURA 11).

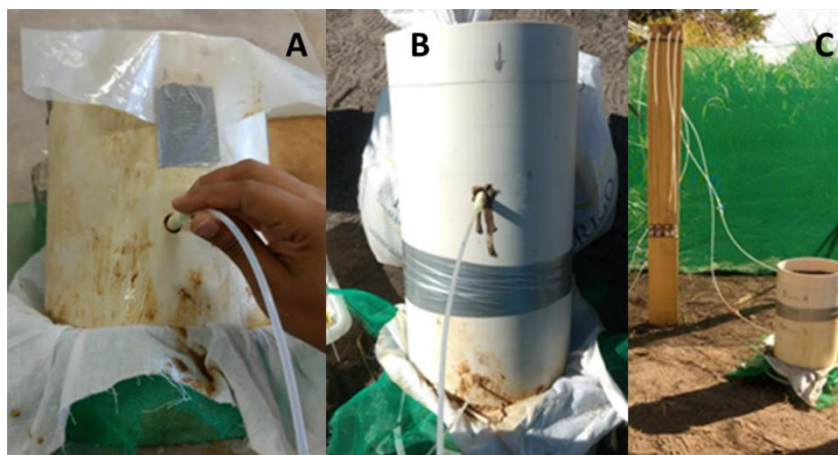
Figura 11 - Confeção dos tensiômetros



Fonte: Elaborado pela autora

A instalação dos tensiômetros foi feita em uma repetição, de forma com que cada cápsula ficasse na metade de cada camada de solo (FIGURAS 12A e 12B), portanto, as cápsulas foram instaladas aos 10 cm (no horizonte A) e aos 30 cm de profundidade (no horizonte B), contados a partir do topo do horizonte A (FIGURA 12C).

Figura 12 - Instalação dos tensiômetros



Fonte: Elaborado pela autora

A irrigação foi feita manualmente com água da torneira, utilizando uma proveta graduada. Para o volume de reposição de água correspondente a cada tratamento, foi utilizada a curva característica de água no solo.

Assim, a altura da coluna de mercúrio do horizonte A correspondia à umidade na capacidade de campo em 10 kPa (CC) e no horizonte B, a altura da coluna de mercúrio correspondia à umidade que permitia ter os 0,04; 0,06; 0,09; 0,11 e 0,13 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ de poros livres de água. Sabendo disso, procedia-se da seguinte forma: **Para o Horizonte A** - umidade na CC menos a umidade atual multiplicado pelo volume da coluna do horizonte A; **Para o Horizonte B** - umidade correspondente a cada tratamento menos a umidade atual multiplicado pelo volume do horizonte B. Ao final, eram somadas as quantidades de água dos horizontes A e B, e o total era adicionado ao solo.

Porém, para que a coluna permanecesse por mais tempo na altura pré-estabelecida, foram feitos ajustes na quantidade de água adicionada ao solo. Essa medida foi necessária devido à irrigação não ter sido feita por método de irrigação localizada para cada horizonte, e além de considerar a grande dinâmica existente nos processos entre a planta, o solo e a atmosfera.

Depois da implantação da cultura, as leituras na coluna de mercúrio foram feitas de hora em hora, das 8 às 17h, totalizando 10 leituras diárias.

A cultura utilizada foi a do milho, visto que a mesma é sensível à hipóxia no solo (REN *et al.*, 2014), cultivar BRS 2022, de ciclo precoce, com florescimento masculino e feminino aos 58 dias (PACHECO *et al.*, 2009), da empresa Agriplant, fornecida pela Secretaria de Agricultura do estado do Ceará. O plantio foi realizado dia 26/06/2018 e a emergência deu-se no dia 29/06/2018. Contabilizados a partir da emergência, aos 9 dias, fez-se o desbaste, deixando uma planta por vaso; aos 10 dias iniciaram-se os tratamentos e aos 41 dias o experimento foi retirado. Do plantio ao início dos tratamentos, objetivando o estabelecimento da cultura, foi adicionada uma quantidade de água padrão para todas as plantas.

A adubação foi feita via solução nutritiva e baseada na análise do solo do horizonte B com caráter coeso. Logo, corrigiu-se o teor de nitrogênio para 30 mg/dm^3 (Sulfato de amônio), fósforo para 30 mg/dm^3 (Fosfato monoamônio), potássio para 90 mg/dm^3 (cloreto de potássio), magnésio para 37,5 mg/dm^3 (sulfato de magnésio), cálcio para 3 cmol/dm^3 (cloreto de cálcio), magnésio para 1 cmol/dm^3 (sulfato de magnésio), zinco para 3 mg/dm^3 (sulfato de zinco), ferro para 4 mg/dm^3 (rexolin), boro para 1,4 mg/dm^3 (ácido

bórico), manganês para 2,5 mg/dm³ (sulfato de manganês) e o cobre foi elevado para 2 mg/dm³ (sulfato de cobre).

Quando necessário, durante a condução do experimento, o controle fitossanitário foi realizado.

3.5 Variáveis analisadas

3.5.1 Variáveis do solo: permeabilidade intrínseca do solo ao ar e índice de continuidade de poros

Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas no horizonte B com caráter coeso e utilizadas para a determinação da permeabilidade intrínseca do solo ao ar, segundo o princípio da pressão decrescente (KIRKHAM, 1946). As amostras, em anéis volumétricos, foram equilibradas nas tensões que correspondiam às porosidades de aeração utilizadas no experimento (0,04; 0,06; 0,09; 0,11 e 0,13 cm³ cm⁻³) e por elas, fez-se passar uma quantidade de ar correspondente à pressão de 1 kPa no reservatório. Durante a avaliação, foi determinado eletronicamente o decaimento da pressão no tempo até atingir o equilíbrio com a pressão atmosférica, utilizando o *software* PermeAr v.1.0 (SILVEIRA *et al.*, 2011). Para a determinação do coeficiente de permeabilidade ao ar (K_{ar}) utilizou-se a equação 5:

$$K_{ar} = \frac{L\eta V}{AP_{atm}} \times |S|, \quad \text{Eq. (5)}$$

Sendo: K_{ar} o coeficiente de permeabilidade ao ar (m²), V o volume de ar que passa pelo cilindro (m³), η a viscosidade dinâmica do ar (Pa.s), L a altura do anel volumétrico (m), A a secção transversal da amostra de solo (m²), P_{atm} a pressão atmosférica local (Pa) e S o coeficiente angular da regressão linear da pressão (ln da pressão) em função do tempo.

Também foi determinado o índice de continuidade de poros, K_1 , sugerido por Groenevelt, Kay e Grant (1984), o qual foi obtido a partir da razão entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar e a porosidade de aeração (Equação 6):

$$K_1 = K_{ar}/\varepsilon_{ar}. \quad \text{Eq (6)}$$

Sendo: K_1 o índice de continuidade de poros, K_{ar} a permeabilidade intrínseca do solo ao ar e ε_{ar} a porosidade de aeração.

3.5.2 Variáveis da planta

Trocas gasosas foliares

Aos 28 e 39 dias após a germinação foram feitas as medições das trocas gasosas (fotossíntese (A)- $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, transpiração (E)- $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, condutância estomática (g_s)- $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e concentração interna de CO_2 (C_i)- $\mu\text{mol mol}^{-1}$ com o auxílio de um analisador de gás infravermelho, o IRGA (modelo LI-6400XT, Licor Biosciences Inc., Lincoln, Nebraska, USA) com fonte de radiação artificial de $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e sob condições de temperatura e concentração de CO_2 ambientes (FIGURA 13). Ademais, a medição da temperatura da folha também foi feita.

Figura 13 - Avaliação das trocas gasosas foliares nas plantas de milho



Fonte: Elaborado pela autora

As leituras foram feitas no horário de 8 às 10 horas, na quarta folha completamente expandida a partir do ápice. A eficiência intrínseca do uso da água foi calculada pela razão A/g_s e a eficiência de carboxilação calculada pela razão A/C_i .

Para a avaliação dos dados de trocas gasosas foi feita a média das duas avaliações, visto que as leituras foram realizadas em datas próximas e as plantas estavam na fase vegetativa, com 9 a 12 folhas emitidas. Ademais, as condições atmosféricas não tiveram consideráveis mudanças no momento da realização das duas avaliações (TABELA 6).

Tabela 6 - Variáveis atmosféricas no momento das leituras

Leituras	DPV folha – ar	Temp. ar
	kPa	°C
1	2,96	32
2	3,01	32

Fonte: Elaborado pela autora

DPV folha-ar: Déficit de pressão de vapor entre a folha e o ar

Teores de clorofila: Índice SPAD

Aos 28 e 39 dias após a germinação foram feitas as medições do teor relativo de clorofila total nas folhas das plantas de milho. Para isso, foi utilizado um aparelho medidor portátil (SPAD, modelo 502, da marca Minolta). As leituras foram feitas nos horários de 8 às 10 horas, na quarta folha completamente expandida a partir do ápice (FIGURA 14). Os valores foram expressos em unidades SPAD. Nesse caso, também foi feita a média das duas leituras para a análise dos dados.

Figura 14 - Avaliação do conteúdo de clorofila nas folhas de plantas de milho



Fonte: Elaborado pela autora

Comprimento do colmo

O comprimento do colmo (cm) foi medido aos 40 dias após a germinação (DAG) com o auxílio de uma trena métrica graduada, levando-se em conta a distância vertical entre o colo da planta e a altura de inserção das folhas apicais.

Diâmetro do caule

O diâmetro do caule (mm) foi medido aos 40 DAG com o auxílio de um paquímetro digital. Foi considerada, para a medição, a altura em torno do segundo internódio (FIGURA 15).

Figura 15 - Mensuração do diâmetro do caule das plantas do milho



Fonte: Elaborado pela autora

Área foliar

Após a coleta das plantas, aos 41 DAG, foi realizada a determinação de área foliar ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$). Assim, as folhas foram destacadas do caule e passadas no aparelho. Para essa avaliação foi utilizado um integrador de área (LI-3100, Li-Cor, Inc. Lincoln, NE, USA) pertencente ao Laboratório da Estação Agrometeorológica, da Universidade Federal do Ceará (FIGURA 16).

Figura 16 - Mensuração da área foliar das plantas do milho



Fonte: Elaborado pela autor

Matéria seca da parte aérea

Ao final do experimento (41 DAG), as plantas foram coletadas e a parte aérea das plantas foi acondicionada em sacos de papel e colocada em estufa de circulação forçada de ar (65°C) até atingir peso constante, por aproximadamente, 42 horas. Posteriormente, o material foi pesado em balança. Os valores foram expressos em gramas (g).

Matéria seca da raiz

Ao final do experimento, as raízes foram coletadas e lavadas para retirar o solo. Após secagem para retirar o excesso de água, elas foram acondicionadas em sacos de papel e colocadas para secar em estufa com circulação de ar forçado (65 °C) até atingir peso constante, por aproximadamente, 42 horas. Em seguida, o material foi pesado em balança para a obtenção da massa seca da raiz.

As raízes adventícias foram cortadas, acondicionadas em sacos de papel e colocadas para secar em estufa com circulação de ar forçado (65 °C) até atingir peso constante, por aproximadamente, 42 horas. Posteriormente, o material foi pesado em balança para a obtenção da massa seca da raiz adventícia. Os valores, nos dois casos, foram expressos em gramas (g).

Massa seca total e Razão raiz/parte aérea

Massa seca total foi obtida somando-se a massa seca da parte aérea, massa seca da raiz e massa seca das raízes adventícias e o resultado expresso em gramas. A raiz/parte aérea foi calculada dividindo a massa seca da raiz pela massa seca parte aérea.

Avaliação nutricional

Após a secagem da parte aérea, o material foi triturado em moinho tipo Wiley e, após fazer isso, foram preparados os extratos, segundo o método proposto pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), em que o nitrogênio foi obtido pela digestão do material por ácido sulfúrico mais peróxido de hidrogênio e a determinação foi feita por titulação pelo método de Kjeldahl (SILVA, 2009). Para os demais nutrientes a abertura da amostra foi feita com os ácidos nítrico e perclórico. As determinações do fósforo e enxofre foram realizadas pelo fotolorímetro; o potássio pelo fotômetro de chama; cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco foram determinados pelo espectrômetro de absorção atômica.

3.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov e posteriormente foram ajustados a modelos de regressão polinomial ou linear. A análise de variância da regressão (ANAVA) testou a significância dos modelos e dos parâmetros da equação e; quando esses foram significativos a 5%, foi escolhido o modelo de melhor ajuste pelo maior coeficiente de determinação (R^2). Para a avaliação da permeabilidade intrínseca do solo ao ar, do índice de continuidade de poros K1 e massa seca total das raízes no horizonte A e B com caráter coeso foi realizada a análise de variância e foi feita comparação das médias pelo teste de Tukey a 5 %. As análises foram realizadas utilizando o software SISVAR (FERREIRA, 2010).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variáveis físicas do solo: permeabilidade intrínseca do solo ao ar e Índice de continuidade de poros

Os resultados de permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) mostram que com o aumento da porosidade de aeração, também aumentou a área disponível ao fluxo de ar (TABELA 7). O tratamento de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração apresentou o menor valor de permeabilidade ($\text{Log } K_{ar}$ de $0,91 \mu\text{m}^2$) e o tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração apresentou o maior valor ($\text{Log } K_{ar}$ de $1,33 \mu\text{m}^2$), entretanto, estatisticamente iguais aos tratamentos de $0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Contudo, considerando os dois extremos, verificou-se aumento de 46% da menor para maior porosidade de aeração.

Tabela 7 - Permeabilidade intrínseca do solo ao ar no horizonte B com caráter coeso, com o desvio padrão da média, em diferentes porosidades de aeração

Porosidade de aeração ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)				
0,04	0,06	0,09	0,11	0,13
..... $\text{Log } k_{ar} (\mu\text{m}^2)$				
0,91a \pm 0,18	1,07b \pm 0,12	1,18bc \pm 0,09	1,26c \pm 0,08	1,33c \pm 0,08

Fonte: Elaborado pela autora

Valores seguidos por letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade

A permeabilidade ao ar tem relação inversa com o conteúdo de água do solo, sendo que, à medida que aumenta a proporção de poros com ar, maior será a área disponível ao fluxo de ar (SILVA *et al.*, 2009; ALENCAR *et al.*, 2016), o que numericamente, pôde-se confirmar. Porém, no presente trabalho, mesmo aumentando a porosidade livre de água, a K_{ar} foi a mesma a partir do tratamento de $0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Dessa forma, considerando o desenvolvimento de plantas em relação à área disponível ao fluxo de ar, percebe-se que, estatisticamente, elas teriam condições semelhantes, em termos de K_{ar} , o que pode favorecer o desenvolvimento das plantas em menores porosidades de aeração ($0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

Pode-se observar também que todos os valores de $\text{Log } K_{ar}$ foram maiores que zero, indicando que os poros disponíveis para o processo de aeração não estão bloqueados. Para McQueen e Shepherd (2002) quando se tem valores de K_{ar} de $1 \mu\text{m}^2$ ($\text{log } K_{ar}=0$),

entende-se que os poros de aeração presentes não contribuem para o transporte de ar no solo. No presente trabalho, o tratamento que mais se aproximou de Log de Kar igual a zero foi o de 0,04 cm³ cm⁻³ de porosidade de aeração.

Em trabalho feito por Menezes *et al.* (2018) comparando horizontes que apresentam o caráter coeso e horizontes que não apresentam esse caráter, também observaram que com a diminuição da umidade do solo, a permeabilidade do solo ao ar também aumentava e, atestaram ainda que o solo com caráter coeso apresentou, de forma geral, menores valores de Kar quando comparado ao solo que não manifestava esse caráter.

Para avaliar se as diferenças observadas em Kar foram apenas devido a variações na porosidade de aeração ou se poderiam ser atribuídas a outros aspectos geométricos do espaço poroso, como a continuidade de poros, calculou-se o índice de continuidade de poros (TABELA 8). Porém, essa variável não foi sensível para detectar diferenças na continuidade dos mesmos.

Tabela 8 - Índice de continuidade de poros (B) no horizonte B com caráter coeso, com o desvio padrão da média, em diferentes porosidades de aeração

Porosidade de aeração (cm³ cm⁻³)				
0,04	0,06	0,09	0,11	0,13
..... Log K1 (μm ²).....				
2,31a ± 0,18	2,29a ± 0,12	2,23a ± 0,09	2,21a ± 0,08	2,21a ± 0,08

Fonte: Elaborado pela autora

Valores seguidos por letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade

4.2 Variáveis da planta

Nas avaliações de trocas gasosas, a variável fotossíntese apresentou tendência quadrática (FIGURA 17A). As menores taxas fotossintéticas foram encontradas nos tratamentos com porosidades de aeração de 0,04 cm³ cm⁻³ e 0,13 cm³ cm⁻³ no horizonte com caráter coeso, com 24,54 μmol CO₂ m² s⁻¹ e 25,50 μmol CO₂ m² s⁻¹, respectivamente. Na porosidade de aeração de 0,04 cm³ cm⁻³ ocorreu uma redução de 11,02% e na porosidade de aeração de 0,13 cm³ cm⁻³ a redução foi de 7,5 % em relação ao ponto em que a fotossíntese foi máxima, sendo que esse ponto foi estimado para a porosidade de aeração de 0,089 cm³ cm⁻³, com taxa fotossintética de 27,58 μmol CO₂ m² s⁻¹.

Considerando-se o tratamento com menor quantidade de poros livres de água (0,04 cm³ cm⁻³), observa-se que o processo fotossintético foi mais afetado. Devido a esse

tratamento, também, ter tido a menor área disponível ao fluxo de ar (TABELA 7), pode-se sugerir que o processo de aeração foi prejudicado. Quando há desbalanços nesse processo, normalmente ocorre déficit de oxigênio no ar do solo (REICHARDT, 2012).

Sendo o milho uma cultura sensível ao déficit de oxigênio no solo (MAGALHÃES *et al.*, 2009; REN *et al.*, 2014), e considerando que, para essa porosidade de aeração, a abertura estomática e transpiração foram maiores (FIGURA 17B e 18A), pode-se inferir que as limitações na taxa fotossintética foram, então, devido a fatores de natureza não estomática.

A leve diminuição de concentração interna de CO₂ (140,72 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) em relação ao ponto em que a concentração de CO₂ foi máxima (154,09 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) (FIGURA 18B) e a menor eficiência instantânea de carboxilação (FIGURA 19A) indicam problemas relacionados com a fixação do CO₂ pela enzima Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) (VU; YELENOSKY, 1992; PEZESHKI, 2001; TIAN *et al.*, 2019), o que justifica a menor taxa fotossintética nesse tratamento.

Plantas crescendo em um estado de hipóxia no solo estão sujeitas a sofrerem limitações estomáticas, o que não foi observado no presente estudo, e limitações não estomáticas. Quando há referências às limitações não estomáticas, muitos autores as atribuem à ineficiência da atividade da enzima rubisco (VU; YELENOSKY, 1992; PEZESHKI, 2001; TIAN *et al.*, 2019).

Tian *et al.* (2019) observaram diminuição na taxa fotossintética de plantas de milho cultivadas em campo e submetidas à diferentes durações do estado de hipóxia no solo. Diante dessa situação, os autores relataram a diminuição da taxa fotossintética à medida que o período de déficit de oxigênio aumentava, fato esse atribuído à diminuição da atividade da enzima Rubisco e da PEP carboxilase.

Além disso, Tian *et al.* (2019) observaram que, no período vegetativo, o efeito sobre o declínio da fotossíntese foi maior quando comparado ao período reprodutivo. No presente trabalho, as avaliações fisiológicas e biométricas também foram realizadas no período vegetativo da cultura, indicando respostas mais pronunciadas da cultura quando submetidas ao estresse por déficit de oxigênio no solo.

Então, se considerarmos um solo para fins agrícolas, aqueles que possuem características que permitam ocorrer baixas porosidades de aeração, que podem levar ao déficit de oxigênio no solo (como é simulado no tratamento de 0,04 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ de porosidade de aeração no horizonte com caráter coeso), poderá ter seu potencial produtivo reduzido,

tendo em vista os possíveis prejuízos no processo fotossintético, o que conseqüentemente, refletirá nos componentes de produção da cultura.

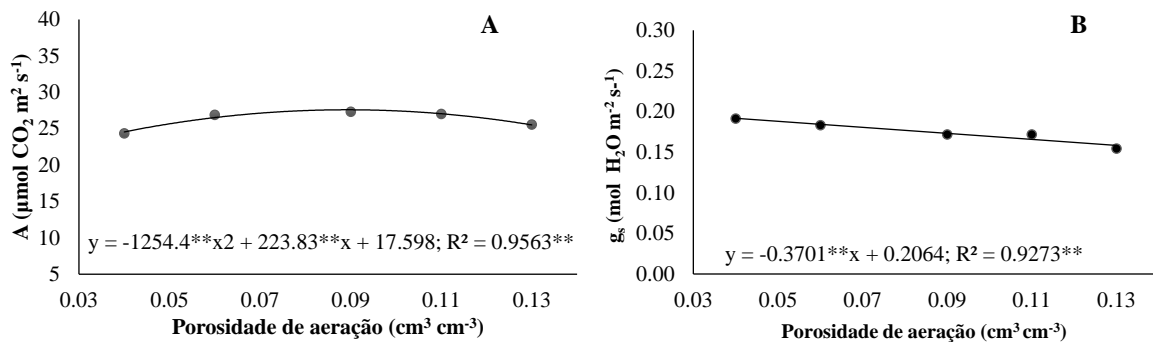
Alguns solos têm maiores potencialidades para expressar problemas relacionados à aeração ineficiente. Logo, estão enquadrados os solos adensados, tais como os solos que apresentam o atributo diagnóstico denominado caráter coeso (SOUZA; SOUZA; CALDAS, 2001; JACOMINE, 2001).

Solos que apresentam o caráter coeso, devido aos processos de formação, tais como a argiluviação (BEZERRA *et al.*, 2014), ajuste face a face das argilas (LIMA NETO *et al.*, 2010), baixo grau de seleção da areia, com predomínio da fração média a fina promovendo o empacotamento cerrado das partículas do solo, induzem à maior manifestação das forças de coesão (BEZERRA *et al.*, 2014; MENEZES *et al.*, 2018) e tornam a estrutura maciça. Esses fatores levam à redução da porosidade total, aumento da microporosidade e diminuição da macroporosidade nesses horizontes (TABELA 5).

Essas características são responsáveis por tornar o movimento da água no perfil do solo mais lento e, portanto, permitem atingir condições de baixa porosidade de aeração rapidamente depois de uma chuva, por exemplo. Isso tem conseqüências diretas no processo de trocas gasosas entre o solo e a atmosfera que, conseqüentemente, refletirá em prejuízos de processos biológicos fundamentais da planta, a exemplo da fotossíntese.

A diminuição da fotossíntese no tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (FIGURA 17A) pode ser explicada pela diminuição da abertura estomática (FIGURA 17B). Com a redução da abertura dos estômatos, a entrada de CO_2 é dificultada, e com isso, a quantidade de substrato necessária para que o processo fotossintético aconteça é diminuída.

Figura 17 - Fotossíntese: A (A); Condutância estomática: g_s (B) em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração



Fonte: Elaborado pela autora

(**) nas equações de regressão indicam significância a 5 % de probabilidade

O fechamento estomático é uma das primeiras respostas da planta ao estresse hídrico leve e moderado, resultando em menor difusão do CO₂ para os sítios de carboxilação. Essa resposta de regulação dos estômatos são bem rápidas, bastando, para isso, qualquer mudança no potencial hídrico da raiz e, em questão de minutos, ocorrem respostas na condutância estomática (ZHANG *et al.*, 2013).

Nesse tratamento (0,13 cm³ cm⁻³), tem-se a maior quantidade de poros livres de água, ou seja, maior quantidade de poros livres para realizar o processo de trocas gasosas; ademais, tem-se a maior área disponível ao fluxo de ar (TABELA 7), indicando que não houve problemas em termos de aeração. Entretanto, observa-se que a taxa fotossintética não acompanha esse aumento, pelo contrário, diminuiu (FIGURA 17A).

Letey (1985), afirma que, além do oxigênio, a água, resistência à penetração e temperatura são fatores diretos que afetam o crescimento da planta (consequentemente afetam os processos fisiológicos realizados por elas).

Dessa forma, no tratamento de 0,13 cm³ cm⁻³ de porosidade de aeração, apesar da maior área disponível ao fluxo de ar, outros fatores diretos influenciaram nessa resposta, como a diminuição do conteúdo de água, uma vez que o aumento de poros ocupados com ar implica na diminuição dos poros ocupados com água, pois ar e água são, normalmente, os fluidos que ocupam o espaço poroso do solo; Outro fator que deve ter influenciado foi o aumento da resistência à penetração, visto que com a diminuição do conteúdo de água no solo, a resistência do solo ao crescimento das raízes aumenta, pois incrementam as forças de coesão entre as partículas do solo (ASSIS *et al.*, 2009). Tais fatores, possivelmente, influenciaram a menor absorção de água pelas plantas, culminando no fechamento estomático.

Os tratamentos intermediários (0,06 cm³ cm⁻³; 0,09 cm³ cm⁻³ e 0,11 cm³ cm⁻³) apresentaram maiores taxas fotossintéticas (FIGURA 17A), sendo o tratamento de 0,09 cm³ cm⁻³ o que apresentou a maior fotossíntese. Ao observar a Figura 17B, os valores de condutância estomática diminuíram em relação ao tratamento de 0,04 cm³ cm⁻³, porém os valores de concentração interna de CO₂ aumentaram, indicando que a diminuição na condutância não foi suficiente para causar reduções na taxa fotossintética. Em outras palavras, não ocorreram limitações de ordem estomáticas.

Limitações de ordem estomáticas têm grande influência na atividade fotossintética, uma vez que, quanto maior a abertura estomática, maior a difusão do CO₂ para a câmara subestomática (SILVA *et al.*, 2015) e, a partir daí, esse substrato é utilizado nas reações de produção de fotoassimilados, aumentando a taxa fotossintética.

É interessante notar que apesar do tratamento de $0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ apresentar a permeabilidade do solo estatisticamente igual ao tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (TABELA 7), esse apresentou maior taxa fotossintética, indicando que essa área disponível ao fluxo de ar já é suficiente para suprir a necessidade da cultura em termos de oxigenação e, provavelmente, as condições de umidade e resistência a penetração não limitaram o processo fotossintético.

A condutância estomática apresentou respostas lineares decrescentes (FIGURA 17B), sendo que à medida que a porosidade de aeração aumentou, a abertura estomática diminuiu, indicando que essa variável foi sensível para detectar a diminuição na umidade no solo. Considerando o tratamento de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração, em que a condutância foi de $0,192 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, a redução na condutância estomática no tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração foi de 18 % (g_s de $0,158 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

O grau de condutância estomática pode ser levado em consideração para indicar o nível de déficit de água no solo. De acordo com a abertura estomática, para plantas de ciclo C_3 , três principais níveis de estresse hídrico são identificados, sendo eles: estresse leve ($g_s > 0,15 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), estresse moderado (g_s entre $0,05$ e $0,15 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e estresse severo ($g_s < 0,05 \text{ mol HO m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (CIFRE *et al.*, 2005; FALCHI *et al.*, 2019).

Apesar da cultura testada no presente trabalho ser de ciclo C_4 , Ghannoum (2009) afirma que os sistemas fotossintéticos de C_3 e C_4 apresentam similaridades quanto à condutância estomática e taxa fotossintética sob diminuição do conteúdo de água da folha. Em plantas C_3 e C_4 , no estresse hídrico leve e moderado, a diminuição da condutância estomática leva à diminuição da taxa fotossintética. O referido autor cita evidências dessa similaridade nos dois sistemas fotossintéticos, são elas: a redução da concentração interna de CO_2 com o fechamento estomático; a capacidade de recuperação da taxa fotossintética em altas concentrações de CO_2 na câmara subestomática; a ocorrência da fotorrespiração; e, se a planta passar por um déficit hídrico, após um período de reidratação, a planta tem a capacidade de recuperar o processo fotossintético.

Por essas semelhanças, optou-se por fazer o uso da escala supracitada. Então, de acordo com os dados de condutância estomática encontrados no presente trabalho, observa-se que o tratamento com $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração, a condutância de $0,15 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ está no limiar entre estresse leve e moderado. Porém, Cifre *et al.* (2005), afirmam que no nível leve de estresse, a fotossíntese diminui de forma discreta, a concentração do CO_2 na câmara subestomática é diminuída e a eficiência intrínseca do uso da água aumentada, respostas essas confirmadas no presente trabalho, sendo indicativo que, para essa abertura estomática, o nível de estresse mais adequado seria o leve. Os autores ainda afirmam que,

nesse nível de estresse, provavelmente, apenas fatores ligados à abertura estomática levam à diminuição da taxa fotossintética.

A menor condutância estomática no tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração (FIGURA 17B) pode ser explicada pelo aumento da porosidade de aeração que reflete na diminuição do conteúdo de água no solo, visto que a condutância estomática é uma variável sensível para detectar tais alterações.

Segundo Kerbauy (2013), o movimento estomático é afetado por qualquer alteração na hidratação da planta. Tal sensibilidade se dá por conta da ação de hormônios como o ácido abscísico (ABA), nas células-guardas, ao detectarem deficiência de água na região do mesófilo foliar, mesmo antes de haver a perda da turgidez e fechamento estomático.

No caso específico da relação entre o fechamento estomático e o déficit hídrico, inicialmente ocorre a produção do ABA de forma mais intensa na região da raiz, posteriormente esse ácido é transportado, via xilema, para a região do mesófilo foliar e, na sequência, para as células-guardas. Nessas células, o ABA promove a entrada de Ca^{2+} e, a partir de então, ocorre uma cadeia de eventos que culmina na saída dos íons responsáveis pela turgescência das células-guardas (K^+ , Cl^- e Malato²⁻). Com a perda desses solutos, há o aumento do potencial osmótico nas células-guardas e, conseqüentemente, do potencial hídrico, provocando a perda de água, a diminuição do turgor e, então, o fechamento estomático (KERBAUY, 2013).

Diferentes sinais entre a raiz e a parte aérea, além do ABA, estão envolvidos na regulação das respostas das plantas diante de fatores de estresse abióticos como déficit hídrico, compactação, situações de anoxia ou hipóxia no solo (AHMED; PASSIOURA; CARMINATI, 2018). Esses sinais podem ser elétricos (SHABALA *et al.*, 2015) e hormonais (ABA, etileno, auxina e citocininas) (GRZESIAK *et al.*, 2013).

Com a manifestação desses sinais, ocorrem alterações no desenvolvimento do meristema apical, na divisão e expansão celular das folhas, promovendo ajuste do crescimento da planta e, portanto, do consumo de água que, por exemplo, pode ser regulado através da diminuição do crescimento foliar e/ou da abertura estomática (AHMED; PASSIOURA; CARMINATI, 2018; SHABALA *et al.*, 2015).

Considerando-se que o conteúdo de água diminui no tratamento de $13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração (na tensão de 25 kPa para esse tratamento), pode-se sugerir que essa tensão, na camada coesa do solo, já foi suficiente para que a planta detectasse a diminuição do conteúdo de água no solo, como foi evidenciado pela redução da condutância estomática (FIGURA 17B).

Nunes (2014), ao estudar sobre a cultura do milho e com solo que apresentava quantidades de areia e argila semelhantes às utilizadas no presente trabalho (TABELA 2), testou tensões de 10, 20, 30, 40 e 50 kPa, e percebeu respostas lineares decrescentes nas variáveis biométricas à medida que aumentava a tensão de água no solo. Pérez-Zamora *et al.* (2004), analisando a cultura do melão, com tensões de 10, 25 e 45 kPa, em solo argiloso, também observou queda na produtividade do fruto já na tensão de 25 kPa. Nesses casos, provavelmente, as variáveis fisiológicas, por serem mais sensíveis à diminuição do conteúdo de água no solo, também diminuiriam.

No caso dos solos com caráter coeso, por eles possuírem grande quantidade de microporos e baixa quantidade de macroporos (TABELA 5) e que a água disponível para a planta, nesse tratamento, a qual está armazenada nos microporos pode favorecer o estresse hídrico, visto que em poros pequenos ocorre a adsorção de água com maior energia, requerendo que as plantas baixem seu potencial energético a fim de que haja a absorção de água e, caso isso não ocorra, elas podem experimentar um déficit hídrico leve.

Um outro fator que pode ter influenciado no fechamento estomático foi o aumento da resistência à penetração das raízes no solo com caráter coeso com o aumento da porosidade de aeração, ou seja, com a diminuição do conteúdo de água no solo.

Tormena, Silva e Libardi (1998) afirmam que o valor de 2MPa, mesmo com a umidade na capacidade de campo, é considerado crítico para o desenvolvimento do sistema radicular. Portanto, o valor de resistência de 1,8 MPa encontrado no presente trabalho, já na tensão de 10 kPa (TABELA 3), indica que o valor de resistência do solo à penetração na tensão de 25 kPa (tensão no tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi maior que o valor considerado limitante de 2 MPa. Esse incremento na resistência é evidente, pois Giarola *et al.* (2001), em suas análises com solos coesos, mostraram que com a diminuição da umidade do solo, a resistência à penetração aumenta de forma exponencial nos solos com caráter coeso e de forma linear nos solos que não apresentam esse caráter.

Sendo assim, pode-se concluir que mesmo havendo maior massa de raízes no horizonte B com caráter coeso, no tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração (FIGURA 21A), essas, provavelmente, devido à maior resistência à penetração das raízes, não se aprofundaram, explorando, assim, um menor volume de solo e, sendo, então, a absorção de água prejudicada.

Menezes (2016), estudando solos com caráter coeso e avaliando a resistência à penetração em Argissolo Vermelho-Amarelo (classe textural franco-argiloarenosa) e outro Argissolo Amarelo (classe textural franco-arenosa), encontrou valores de resistência à

penetração de 2,7 MPa e 1,3 MPa respectivamente, com umidade equilibrada na tensão de 10 kPa. O autor conclui que o maior conteúdo de argila e o adensamento do horizonte com caráter coeso foram responsáveis pelo maior valor de resistência no Argissolo Vermelho-Amarelo.

A maior condutância estomática no tratamento de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração indica que o conteúdo de água no solo, para essa porosidade, foi um ponto fundamental para a abertura estomática. Dessa forma, admite-se que essa quantidade de água foi suficiente para manter as células responsáveis pela abertura estomática, denominadas células-guardas, túrgidas e, conseqüentemente, o ostíolo aberto, o que refletiu em maior perda de água pela planta por transpiração (FIGURAS 17B E 18A).

A diminuição da condutância estomática em solos em condições de hipóxia é amplamente relatada. Um dos principais fatores apontado na literatura para que isso aconteça é a da redução da condutividade hidráulica na raiz, por causa da inativação de proteínas responsáveis pela condução da água, as aquaporinas (GASPAR, 2011; SAUTER, 2013). Nesse trabalho, esse fato não foi observado, o que se permite concluir que o oxigênio disponível nesse tratamento no horizonte com caráter coeso, mesmo sendo na menor porosidade de aeração, foi suficiente para manter a integridade desses canais.

Nos tratamentos intermediários ($0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; $0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), a condutância estomática diminuiu à medida que a porosidade de aeração no horizonte B com caráter coeso aumentou, evidenciando a sensibilidade dessa variável à diminuição do conteúdo de água no solo (FIGURA 17B). Soares *et al.* (2012), investigando sobre plantas de tomate sob estresse hídrico, observaram que à medida que o conteúdo de água diminuía, a abertura estomática também diminuiu. Esses autores afirmam que, das variáveis analisadas, a condutância foi a variável fisiológica mais sensível para detectar o decréscimo de água no solo.

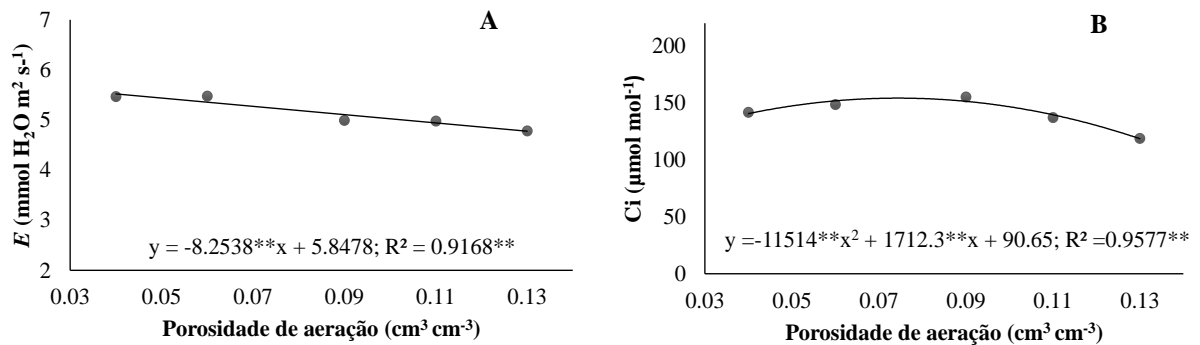
A transpiração teve respostas lineares decrescentes (FIGURA 18A). O tratamento de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração apresentou a maior taxa transpiratória, com $5,52 \text{ mmol H}_2\text{O m}^2 \text{ s}^{-1}$. Já o tratamento com menor transpiração foi o de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração, com $4,77 \text{ mmol H}_2\text{O m}^2 \text{ s}^{-1}$, nesse caso, observa-se uma queda de 13,6% em relação à menor porosidade de aeração.

Segundo Kerbaui (2013), a transpiração via estômatos é responsável por 90 a 95% da perda de água que acontece nas folhas, indicando, portanto, que existe uma alta correlação entre a condutância estomática e a transpiração. No presente trabalho, assim como a condutância estomática, a transpiração também diminuiu com o aumento da porosidade de

aeração. A explicação para isso se dá pelo fato da maior abertura estomática no tratamento de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração ter diminuído a resistência à saída da água da folha. Já no tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração, a maior resistência da folha, dada pelo fechamento estomático, dificultou a perda de água através dos estômatos.

A transpiração nas folhas depende da diferença de concentração do vapor d'água entre os espaços intercelulares das folhas e o ar externo e da resistência à difusão dessa rota. Ao se tratar de resistência à difusão, tem-se a resistência estomática foliar como um componente fundamental para governar a perda de água pelas folhas (TAIZ; ZAIGER, 2013).

Figura 18 - Transpiração: E (A); Concentração interna de CO_2 (B) em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração



Fonte: Elaborado pela autora

(**) nas equações de regressão indicam significância a 5 % de probabilidade

A concentração interna de CO_2 apresentou tendência quadrática (FIGURA 18B). Observa-se que nos tratamentos de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração, a concentração interna de CO_2 foi menor ($140,72 \mu\text{mol mol}^{-1}$ e $118,66 \mu\text{mol mol}^{-1}$, respectivamente). Considerando-se o ponto em que a concentração de CO_2 foi máxima ($154,09 \mu\text{mol mol}^{-1}$), na porosidade de aeração de $0,07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, verifica-se que, para o tratamento de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, houve redução de 8,7 %, e para o tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a redução foi de 23 %.

A leve diminuição na concentração interna de CO_2 no tratamento de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ indica que problemas de ordem bioquímica provavelmente estão acontecendo, visto que nesse tratamento ocorre a maior abertura estomática (não apresentava limitações estomáticas) e a fotossíntese diminuiu. Em solos como deficiência de oxigênio, problemas relacionados com a atividade das enzimas que participam do processo fotossintético, principalmente a Rubisco, são relatados (VU; YELENOSKY, 1992).

Ainda segundo Vu e Yelenosky (1992), em seu trabalho com plantas de limão e laranja, e avaliando a atividade das enzimas envolvidas no processo fotossintético (rubisco e PEP carboxilase), em solos com deficiência de oxigênio, foi verificado que em um ambiente com temperatura de 30 ° C, a atividade da enzima rubisco diminuiu de 23 a 35%, enquanto que a atividade a enzima PEP carboxilase não teve sua atividade afetada nessas condições. Assim, enfatiza-se a sensibilidade da rubisco em ambientes com déficit de oxigênio.

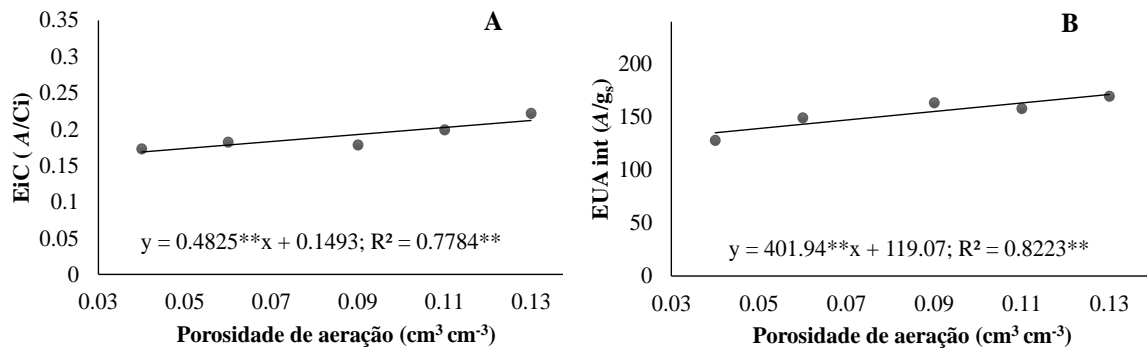
Nos tratamentos intermediários (0,06 cm³ cm⁻³; 0,09 cm³ cm⁻³ e 0,11 cm³ cm⁻³) ocorreu aumento na concentração interna de CO₂ (FIGURA 18B) mesmo com a diminuição da condutância, sendo plausível inferir que esse grau de fechamento dos estômatos não foi suficiente para causar limitações de ordem estomática, visto que para esses tratamentos, a taxa fotossintética aumentou. O aumento da taxa fotossintética, nesses tratamentos, de forma geral, refletiu no aumento de variáveis biométricas da planta, como comprimento e diâmetro do colmo (FIGURA 26A e 26B).

Já no tratamento de 0,13 cm³ cm⁻³, a diminuição da concentração do CO₂, pode ser explicada pelo aumento da resistência dos poros estomáticos, uma vez que a abertura estomática diminuiu nesse tratamento. Ghannoum (2009) relata em seu trabalho o decréscimo da concentração interna de CO₂ em virtude da diminuição da condutância estomática. Para esse autor isso funciona como uma limitação para que a fotossíntese ocorra de forma eficiente nas plantas de metabolismo C₄. O mesmo autor relata comportamentos semelhantes em diferentes culturas, tais como milho, sorgo, cana de açúcar e amaranhus.

A eficiência instantânea de carboxilação (EiC) apresentou respostas lineares crescentes (FIGURA 19A), ou seja, à medida que a porosidade de aeração aumentou, a EiC também aumentou.

A menor eficiência de carboxilação no tratamento de 0,04 cm³ cm⁻³ de porosidade de aeração, pode ser explicada pela menor taxa fotossintética e a concentração interna da CO₂ não ter diminuído consideravelmente (apenas 8,7 % em relação ao ponto de maior concentração interna de CO₂). Dessa forma, havia substrato disponível para realização da fotossíntese, porém não se observou resposta à essa concentração interna de CO₂, indicando problemas de ordem não estomática ligadas, provavelmente, com a atividade da enzima rubisco (PEREIRA *et al.*, 2004).

Figura 19 - Eficiência instantânea de carboxilação: EiC (A); Eficiência intrínseca do uso da água: EUA int (B) em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração



Fonte: Elaborado pela autora

(**) nas equações de regressão indicam significância a 5 % de probabilidade

No tratamento de 0,13 cm³ cm⁻³ de porosidade de aeração, observa-se uma queda mais acentuada na concentração interna de CO₂ (FIGURA 18B) com uma diminuição de 23% em relação ao ponto de maior concentração de CO₂, sem ter, no entanto, tido uma queda muito acentuada na taxa fotossintética, refletindo em uma maior eficiência instantânea de carboxilação.

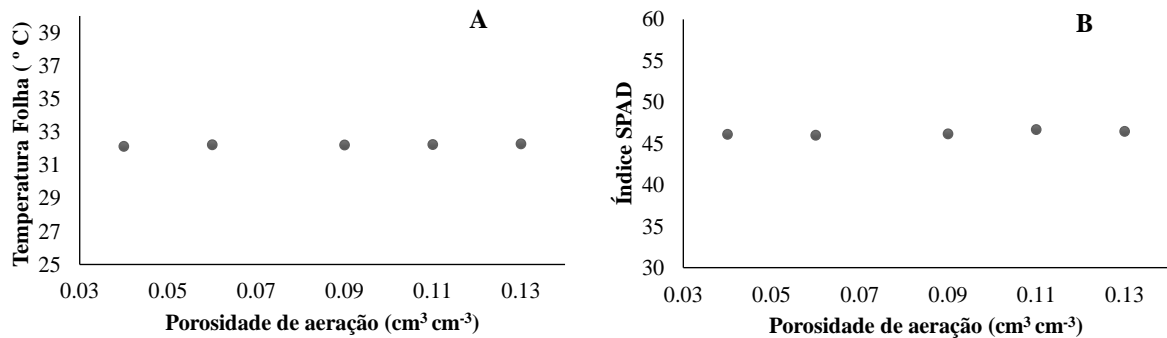
A eficiência intrínseca do uso da água (FIGURA 19B) apresentou respostas lineares crescentes. No tratamento de 0,04 cm³ cm⁻³, o menor valor de eficiência intrínseca do uso da água indica que a menor taxa fotossintética não foi consequência de processos difusivos e sim, de ordem bioquímica, o que pode ser ratificado pela menor eficiência instantânea de carboxilação nesse tratamento (FIGURA 19A).

Para o tratamento de 0,13 cm³ cm⁻³, a maior eficiência intrínseca do uso da água está associada à menor abertura estomática sem, no entanto, refletir em redução drástica na taxa fotossintética, ou seja, mesmo com a diminuição da abertura estomática, a planta não teve a taxa fotossintética drasticamente prejudicada.

Silva *et al.* (2013), estudando plantas de cana de açúcar também encontraram maior eficiência intrínseca do uso da água no tratamento com restrição hídrica, e os autores atribuíram essa resposta à relação inversa entre condutância estomática e eficiência intrínseca do uso da água. É válido ressaltar que no presente trabalho, mesmo o solo não estando sob forte restrição hídrica, evidências do início desse estresse foi notado, como ratifica a variável eficiência intrínseca do uso da água.

Para as variáveis temperatura da folha e o índice SPAD os dados não variaram para os tratamentos avaliados e não se ajustaram aos modelos de regressão (FIGURAS 20A e 20B).

Figura 20 - Temperatura da folha: (A) e índice SPAD (B) em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração



Fonte: Elaborado pela autora

No que diz respeito à massa seca de raízes no horizonte B com caráter coeso (FIGURA 21A), nota-se que os dados se ajustaram a um modelo linear crescente, e por isso, o aumento na massa seca de raízes com o aumento da porosidade de aeração.

O tratamento de 0,13 cm³ cm⁻³ de porosidade de aeração apresentou maior massa seca, com 15,3 g, enquanto a menor massa seca, de 11,9 g, foi obtida no tratamento de 0,04 cm³ cm⁻³ de porosidade de aeração, ocorrendo redução de 22%.

Em solos com baixa porosidade de aeração, os processos de trocas gasosas no solo são prejudicados pelo volume limitado de poros disponíveis para esse processo, além da menor área disponível ao fluxo de ar. Nesse caso, a quantidade de oxigênio no solo não é suficiente para suprir a demanda da planta, uma vez que além das raízes, a fauna do solo e os microrganismos também utilizam e competem por esse gás para a manutenção da respiração, processo esse vital para todos os organismos (TAIZ; ZAIGER, 2013).

A baixa quantidade de oxigênio no solo danifica as raízes pela inibição da respiração celular e esse dano ocorre devido a mudança da respiração aeróbica para a respiração anaeróbica. Na respiração aeróbica, o oxigênio, advindo principalmente do solo, serve com acceptor final de elétrons na cadeia de transporte de elétrons. Na falta desse elemento, as reações bioquímicas anteriores a essa etapa são paralisadas e a planta, como alternativa, inicia a fermentação. Nessa rota alternativa, ocorre baixa produção de ATP quando comparada com a respiração aeróbica, bem como a produção de compostos que acidificam o meio, levando a célula à morte (KERBAUY, 2013).

Destarte, a baixa disponibilidade de oxigênio para as raízes, como deve ocorrer no tratamento $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade da aeração, diminui a produção de compostos energéticos e afeta também a produção de compostos intermediário da respiração, os quais servem de esqueleto de carbono para a síntese de polissacarídeos, ácidos nucleicos, aminoácidos, proteínas e compostos do metabolismo secundário (KERBAUY, 2013). Somase a esses fatores, a baixa taxa fotossintética nesse tratamento (que gera baixas quantidades de compostos de carbono para serem utilizados na respiração). Tudo isso reflete na redução da produção de biomassa da raiz, o que justificaria a menor quantidade de massa seca de raízes encontrada tratamento no $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ em relação aos outros tratamentos.

Coelho *et al.* (2013), ao analisarem duas condições hídricas, solo encharcado e não encharcado, na cultura do milho, observaram a redução na massa seca de raízes no sob anoxia. No presente trabalho, vale ressaltar que, o tratamento de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração no horizonte com caráter coeso não está em um estado de anoxia, mas de hipóxia. Entretanto, mesmo sob condição de hipóxia, esse tratamento já apresentou redução na massa seca das raízes, sendo assim, plausível concluir que 4 % de poros livres de água, em horizontes que apresentam o caráter coeso, já são suficientes para afetar o crescimento da raiz, podendo refletir no crescimento e desenvolvimento da planta.

Além disso, é importante salientar que, nesse tratamento ($0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), mesmo o valor de permeabilidade intrínseca do solo ao ar ter ficado acima do valor considerado crítico de $1 \mu\text{m}^2$ (TABELA 7) (McQUEEN; SHEPHERD, 2002), a massa radicular foi menor, indicando que para esse volume de poros livres de água, a planta respondeu negativamente em relação ao crescimento de raízes.

Vale lembrar que em solos com a presença de camadas compactadas ou adensadas, como é o caso dos solos com caráter coeso, baixas porosidades de aeração no solo são facilmente encontradas, por exemplo, depois de uma chuva, o que leva rapidamente a situações de hipóxia ou anoxia no solo (REZENDE, 2000). Logo, a presença de solos que manifestem o caráter coeso, especialmente quando ocorrem mais superficialmente, deve ser levada em consideração no momento da escolha da área para cultivo ou no momento das escolhas das práticas agrícolas de preparo do solo.

Ademais, prejuízos maiores serão encontrados quanto mais próximos à superfície o horizonte com caráter coeso estiver, pois quanto mais superficial, mais rápida será a diminuição da quantidade de poros livres de água, ou seja, disponíveis ao fluxo de ar. No estado de Alagoas solos com caráter coeso aparecem aos 22 cm a partir da superfície do solo (LIMA NETO *et al.*, 2009); em Sergipe há trabalhos relatando o aparecimento da camada coesa aos 20 cm a partir da superfície (CINTRA; PORTELA; NOGUEIRA, 2004). Ademais,

Rezende (2000) afirma que, de forma geral, em solos cultivados, horizontes com esse caráter aparecem nos 10 a 15 cm a partir da superfície do solo, devido aos problemas relacionados à erosão, evidenciando a real problemática em questão.

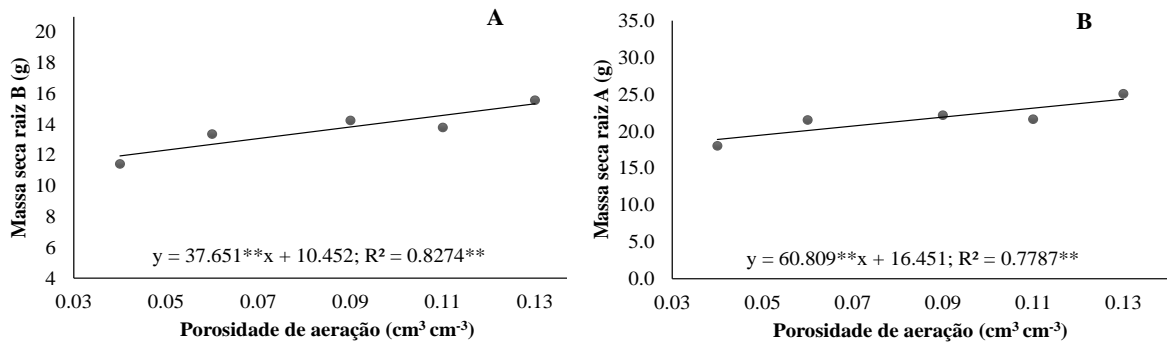
Ao observar o tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, em que a massa seca da raiz foi maior, pode-se inferir que essa porosidade de aeração foi suficiente para permitir os processos de trocas gasosas entre o solo e a atmosfera e, conseqüentemente, promoveu o aumento da massa seca da raiz nesse tratamento. Tal resposta se dá pelo fato da aeração do solo ser um fator que afeta diretamente a respiração das raízes (SÁ; SANTOS JÚNIOR, 2005) e provavelmente contribuiu para o aumento da massa.

É válido ressaltar que nesse tratamento, mesmo apresentando a maior massa de raízes, essa quantidade não foi suficiente para refletir no aumento das variáveis biométricas (comprimento e diâmetro caulinar) (FIGURA 26A e 26B) da planta de milho.

Em solos compactados ou adensados as raízes tendem a permanecer na parte superior dessa camada e, conseqüentemente, diminuir o seu aprofundamento. Em estudo feito por Lipiec *et al.* (2003), com cevada, em solos compactados, com solos de diferentes texturas e em diferentes países, a distribuição de raízes ocorreu de modo similar em todas as texturas e lugares, se concentrando nos primeiros 10 centímetros de solo. Os autores atribuíram essa resposta ao maior crescimento horizontal da raiz devido à orientação horizontal dos poros do solo.

Os solos com caráter coeso também possuem a predominância de poros pequenos e alongados, esses últimos orientados principalmente na posição horizontal (LIMA *et al.*, 2006; MENEZES *et al.*, 2018). Dessa forma, como a densidade do solo e a orientação dos poros eram as mesmas para os todos os tratamentos, os resultados mostram que, no tratamento $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, a resistência à penetração (parâmetro que se modifica com a alteração do conteúdo de água no solo) provavelmente restringiu o aprofundamento do sistema radicular e refletiu numa menor taxa fotossintética, do comprimento e diâmetro caulinar, apesar de apresentar a maior massa seca de raízes quando comparado aos outros tratamentos.

Figura 21 - Massa seca de raiz do horizonte B (A); Massa seca de raiz do horizonte A (B) em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração



Fonte: Elaborado pela autora

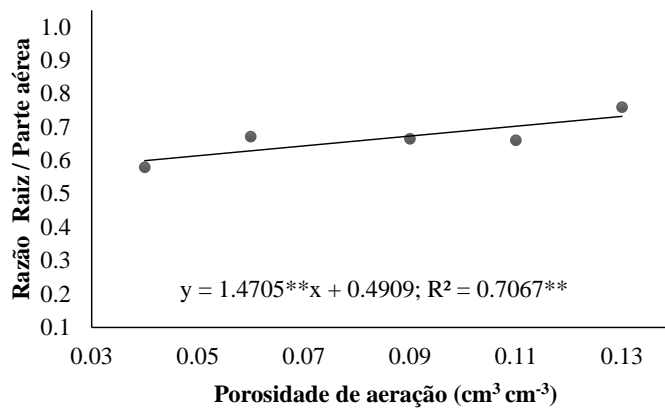
(**) nas equações de regressão indicam significância a 5 % de probabilidade

Em relação à massa seca de raízes no horizonte A (FIGURA 21B), houve a mesma tendência da massa seca de raízes do horizonte B com caráter coeso. Logo, os dados se ajustaram ao modelo linear crescente, ou seja, com o aumento da porosidade de aeração, aumentou a massa seca de raízes. Todavia, a massa seca de raízes do horizonte A foi sempre maior que no horizonte B para todos os tratamentos.

O tratamento de 0,13 cm³ cm⁻³ de porosidade de aeração no horizonte B refletiu em maior massa seca no horizonte A, com 25 g. Já no tratamento de 0,04 cm³ cm⁻³ de porosidade de aeração no horizonte B refletiu na menor massa seca de raízes no horizonte A, de 18 g, ocorrendo redução de 28%.

A razão raiz/parte aérea ajustou-se a um modelo linear crescente (FIGURA 22), portanto, foi maior no tratamento de 0,13 cm³ cm⁻³ de porosidade de aeração, indicando que, nesse tratamento, a planta investiu mais na produção da biomassa de raiz, em detrimento da parte aérea. Já o contrário aconteceu no tratamento de 0,04 cm³ cm⁻³, em que essa relação foi menor, ou seja, a alocação de biomassa para a raiz foi diminuída.

Figura 22 - Razão raiz/parte aérea em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração



Fonte: Elaborado pela autora

(**) nas equações de regressão indicam significância a 5 % de probabilidade

Maior relação raiz/parte aérea normalmente é encontrada em situações em que há déficits hídricos mais acentuados (FIGUEIRÔA; BARBOSA; SIMABUKURO, 2004; TAIZ; ZAIGER, 2013; SCALON; MUSSURY, 2011); contudo, no presente trabalho, mesmo na umidade em que o solo não tenha atingido a consistência muito dura a extremamente dura, essa resposta morfológica já foi encontrada para a maior porosidade de aeração, ou seja, menor umidade.

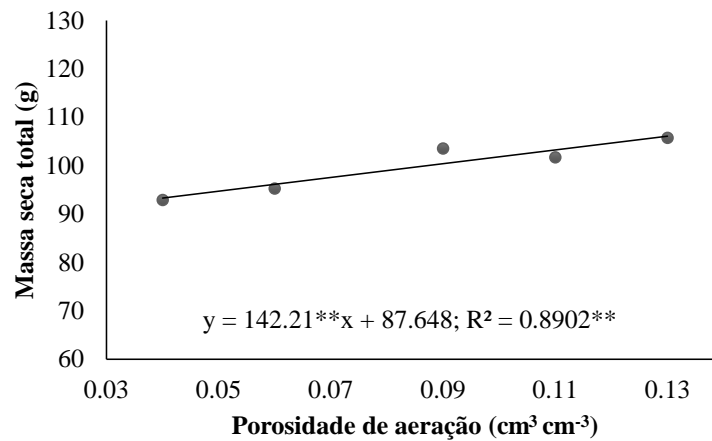
Nesse contexto, o consumo de carbono e energia na parte aérea é diminuído e maiores quantidades de fotoassimilados são alocados para a raiz no intuito de aumentar o crescimento e a absorção de água para que a planta possa continuar crescendo, um caso típico de plasticidade fenotípica radicular (ZONTA *et al.*, 2018).

Para o estudo em questão, apesar dessa aclimatação, deve-se ressaltar que na tensão de 25 kPa (correspondente ao tratamento de 0,13 cm³ cm⁻³) a planta, provavelmente, já teve dificuldades para absorver água e a maior resistência à penetração das raízes, nesse tratamento, possivelmente, impediu que a raiz se aprofundasse e a absorção de água fosse prejudicada, potencializando o efeito do estresse hídrico.

No tratamento de 0,04 cm³ cm⁻³ a menor razão raiz/parte aérea pode ser explicada pela diminuição da massa seca de raízes, que, como visto anteriormente, a baixa porosidade de aeração prejudicou o processo de respiração das raízes, o que refletiu na menor produção de biomassa radicular. Reduções na razão raiz/parte aérea são típicas das plantas em situações de hipóxia e também foram encontradas por Gonçalves (2009).

A massa seca total apresentou respostas lineares crescentes (FIGURA 23). Observa-se que, no tratamento de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração, a produção de massa seca total foi menor, resultado que está associado à menor massa seca das raízes do horizonte B (FIGURA 21A). Esse fato pode ser explicado pela menor taxa fotossintética obtida nesse tratamento, visto que a matéria seca reflete o total de fotoassimilados acumulados na planta resultante do processo fotossintético (REN *et al.*, 2016).

Figura 23 - Massa seca total em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração



Fonte: Elaborado pela autora

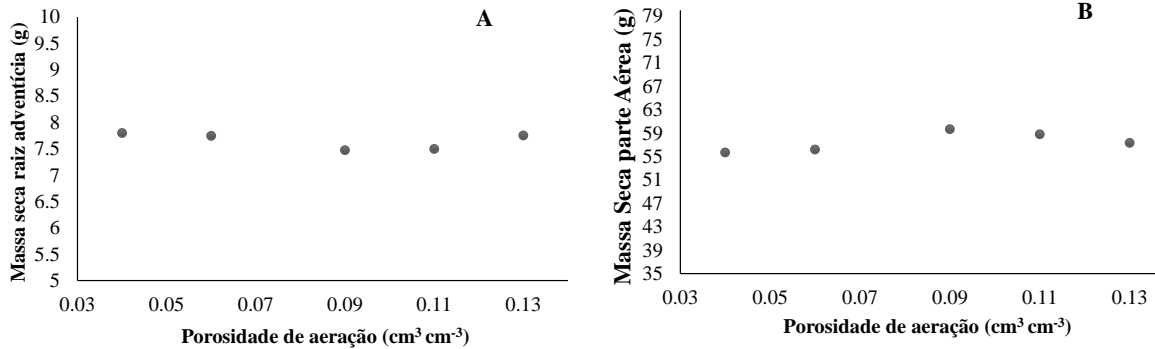
(**) nas equações de regressão indicam significância a 5 % de probabilidade

Outros estudos com estresse hídrico por hipóxia também relataram a diminuição da produção de matéria seca em resposta ao estresse hídrico e a diminuição da taxa fotossintética em plantas de milho (REN *et al.*, 2016; TIAN *et al.*, 2019), em plantas de soja (YOUN *et al.*, 2008) e em plantas de trigo (ROBERTSON *et al.*, 2009).

Já no tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração, a massa seca total foi maior (FIGURA 23), também muito influenciada pela massa seca total de raízes do horizonte B (FIGURA 21A), haja vista que a massa seca da parte aérea praticamente não variou entre os tratamentos avaliados (FIGURA 24B). Grande parte dos fotoassimilados, produzidos no processo fotossintético pelas plantas desse tratamento, foram direcionados para as raízes, aumentando, portanto, sua massa. Fato esse que pode ser sustentado ao se observar a maior razão raiz/parte aérea para esse tratamento (FIGURA 22).

As variáveis massa seca das raízes adventícias e massa seca da parte aérea (FIGURA 23A e 23B) não variaram para os tratamentos avaliados e não se ajustaram aos modelos de regressão.

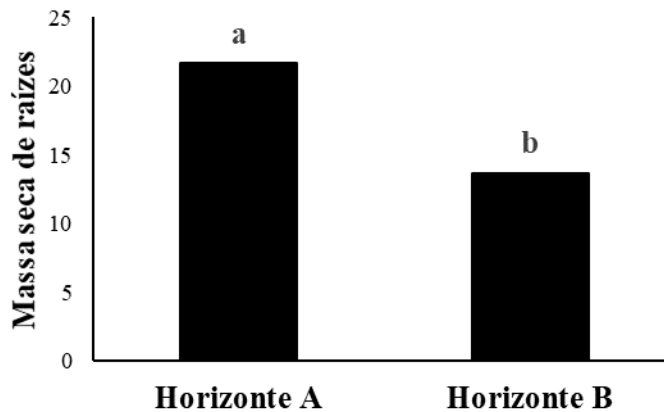
Figura 24 - Massa seca das raízes adventícias (A) e Massa seca da parte aérea (B) em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração



Fonte: Elaborado pela autora

Comparando-se a massa seca de raízes produzida entre o horizonte A e o horizonte B com caráter coeso, percebe-se que o horizonte B com caráter coeso produziu menos raízes em relação ao horizonte A (FIGURA 25), sendo que no horizonte B com caráter coeso a massa seca das raízes média foi de 13,7 g e no horizonte A de 21,7 g. Dessa forma, observa-se que 61% do total das raízes estavam localizadas no horizonte A e 39 % do total das raízes estavam localizadas no horizonte B com caráter coeso.

Figura 25 - Massa seca de raízes no horizonte A e no horizonte B com caráter coeso



Fonte: Elaborado pela autora
 Letras distintas indicam diferença estatística pelo teste e Tukey a 5% de probabilidade.

A explicação para essa redução se dá devido ao horizonte A fornecer melhores condições para o desenvolvimento radicular como, por exemplo, apresentar menor densidade, maior porosidade total, maior macroporosidade e menor microporosidade (TABELA 5).

Assim, as características inerentes ao horizonte com caráter coeso, tais como: maiores valores de densidade e de microporosidade, menores valores de porosidade total e macroporosidade, além do aumento da resistência à penetração das raízes, refletem negativamente no desenvolvimento do sistema radicular, fazendo com que as raízes tendessem à superficialização (CINTRA, 2001; SANTANA *et al.*, 2006).

Cintra *et al.* (1997 apud CINTRA, 2001), estudando solos que apresentavam o caráter coeso e fazendo a quantificação de raízes de porta-enxerto de citrus, observaram a tendência de superficialização do sistema radicular. Nesse caso, os autores constataram que 90% do sistema radicular ficou localizado nos primeiros 40 cm de solo, e o que seria mais preocupante é que 61% do total do sistema radicular estava localizado nos 20 primeiros centímetros de solo.

Urge ressaltar que solos com horizontes subsuperficiais coesos ocorrem na Unidade Geomorfológica dos Tabuleiros Costeiros, área essa com extensão de aproximadamente 20 milhões de hectares no Brasil (REZENDE, 2000), evidenciando a relevância desse problema.

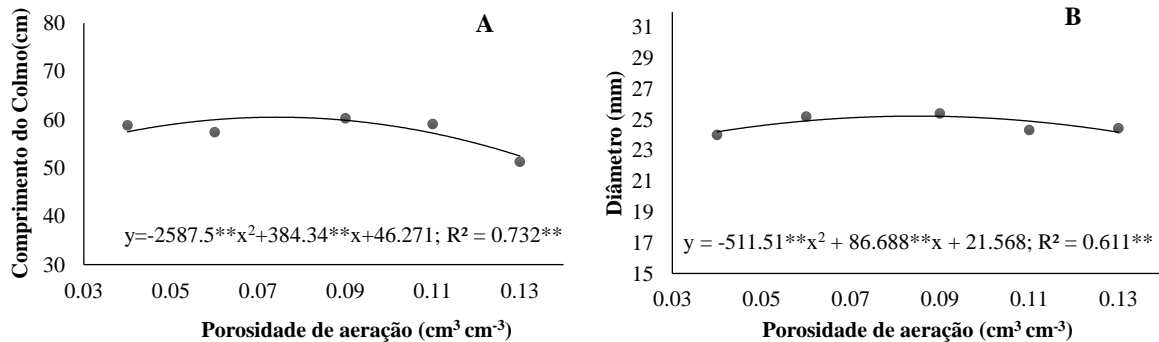
Essa unidade geomorfológica é de grande importância para a produção na Região Nordeste, pois ela localiza-se em área uma com precipitações anuais regulares, em torno de 1200 mm/ano, apresentam solos de relevo plano à suave ondulado, são próximos à centros comerciais e populacionais, o que propicia a produção e comercialização dos produtos agrícolas. Entretanto, em parte dessa unidade se observa a ocorrência de horizontes coesos superficiais (LIBARDI; MELO FILHO, 2001; CINTRA, 2001), o que poderia agravar a problemática abordada.

Essa elevada precipitação pluvial, concentrada em poucos meses, pode ocasionar, nos solos com horizonte com caráter coeso, a condição de hipóxia, ou até mesmo de anoxia temporária.

O comprimento do colmo apresentou resposta quadrática (FIGURA 26A), com o maior comprimento (60,5 cm) estimado para a porosidade de aeração de $0,07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Os menores comprimentos foram encontrados nos tratamentos com porosidades de aeração de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ no horizonte com caráter coeso, com 57,5 e 52,5 cm, respectivamente. Na porosidade de aeração de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ocorreu uma redução de 5% e na

porosidade de aeração de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a redução foi de 13% em relação ao ponto em que o comprimento do colmo foi máximo.

Figura 26 - Comprimento do colmo (A); Diâmetro caulinar (B) em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração



Fonte: Elaborado pela autora

(**) nas equações de regressão indicam significância a 5 % de probabilidade

O pequeno comprimento do caule na porosidade de aeração de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ pode ser atribuído à menor aeração nesse tratamento, que refletiu na diminuição da taxa fotossintética e, conseqüentemente, menor produção de fotoassimilados. O colmo, além de sustentar o crescimento das folhas, tem a importante função de funcionar como órgão de reserva, ou seja, acumular fotoassimilados para o posterior uso na fase de enchimento de grãos (MAGALHÃES; DURAES; GOMIDE, 1996). Nos tratamentos de $0,04 \text{ cm}^3$, essa função pode ser prejudicada tendo em vista seu pequeno comprimento e menor diâmetro (FIGURAS 26A e 26 B).

Nos tratamentos intermediários ($0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; $0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) (FIGURA 26A) o comprimento do colmo aumentou. Esse aumento do comprimento, provavelmente, foi influenciado pelas melhores condições de porosidades de aeração (em relação ao tratamento com maior umidade no solo) e a menor resistência à penetração (em relação ao tratamento com menor conteúdo de água). Tais condições, possivelmente, influenciaram positivamente as variáveis fisiológicas e, conseqüentemente, refletiu no aumento do comprimento do colmo.

No tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, o comprimento do colmo diminuiu (FIGURA 26A). Logo, há a possibilidade de que a maior resistência à penetração no horizonte adensado e a diminuição de absorção de água pela planta terem influenciado nessa resposta da planta. Segundo Taiz e Zaiger (2013), em muitas plantas, quando há reduções no fornecimento

hídrico, acontece a inibição do crescimento do caule, visto que o processo de expansão celular é afetado e é extremamente responsivo ao déficit hídrico. Além disso, a taxa fotossintética foi menor nesse tratamento, o que, provavelmente, contribuiu para a diminuição do comprimento do caule.

O diâmetro caulinar se ajustou ao modelo quadrático (FIGURA 26B), sendo que o maior diâmetro foi estimado para a porosidade de aeração de $0,085 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (25,24 mm). Os tratamentos de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração apresentaram diâmetros de 24,22 mm e 24,19 mm, respectivamente. Ocorrendo assim, uma redução de 4% nos dois tratamentos, quando comparados com o maior diâmetro estimado.

O menor diâmetro caulinar no tratamento de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de porosidade de aeração pode ser explicado pelas condições de hipóxia encontradas no horizonte com caráter coeso. A deficiência de oxigênio nesse horizonte refletiu no baixo desenvolvimento das raízes, que consequentemente refletiu na diminuição da fotossíntese. A diminuição da produção de fotoassimilados, provavelmente, influenciou, mesmo que pouco, na diminuição da espessura do caule.

Os tratamentos intermediários ($0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; $0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) apresentaram, de forma geral, os maiores diâmetros, sendo o tratamento $0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ o que mais se aproximou do ponto em que o diâmetro caulinar foi máximo. Isso pode ser explicado pelas melhores condições para o desenvolvimento do sistema radicular. Nesses tratamentos as maiores taxas fotossintéticas foram encontradas (FIGURA 17A), o que refletiu no aumento da espessura do caule.

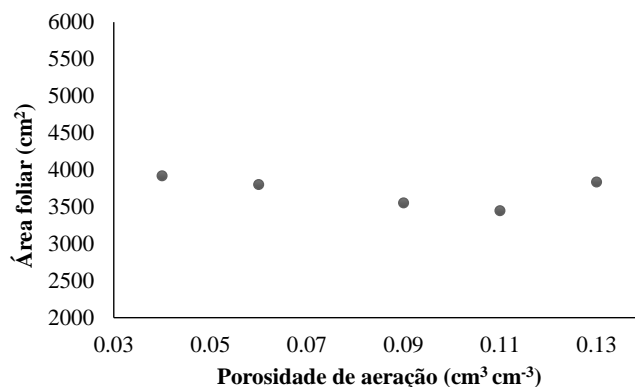
Já no tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ no horizonte B com caráter coeso, a diminuição do diâmetro do caule pode ser atribuída às condições do solo mais adversas para o aprofundamento das raízes. Assim, nesse tratamento, mesmo apresentando as melhores condições em termos de aeração do solo em relação aos outros tratamentos, e permeabilidade intrínseca do solo ao ar ser maior que nos tratamentos com menores porosidades de aeração (TABELA 7), outros fatores como a resistência à penetração das raízes e o fato da água, estar retida com mais força nos microporos, pode ter influenciado em sua menor absorção pela planta.

Quando uma planta está em déficit hídrico, ela desencadeia respostas fisiológicas, ligadas ao reconhecimento do estresse pelo sistema radicular e a alteração no turgor nas células da raiz, que reflete no fechamento estomático; respostas bioquímicas, ligadas à diminuição da atividade fotoquímica da fotossíntese e da atividade da enzima Rubisco e; respostas moleculares como ativação de genes ligados à síntese do ácido abscísico. Todos

esses fatores reduzem a atividade fotossintética, que reflete na diminuição da síntese proteica e da parede celular, bem como a diminuição da taxa de expansão celular (CHAVARRIA; SANTOS, 2012). O conjunto dessas respostas afeta o crescimento de plantas, nesse caso, diminuindo o diâmetro do colmo.

A variável área foliar (FIGURA 27), não apresentou diferença significativa e não se ajustou aos modelos de regressão.

Figura 27 - Área foliar em plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração



Fonte: Elaborado pela autora

4.3 Teores de nutrientes na parte aérea

Em relação aos teores de nutrientes da parte aérea das plantas de milho, apenas o nitrogênio e potássio apresentaram diferença significativa e se ajustaram aos modelos de regressão (FIGURA 28A e 28B). Fósforo, enxofre, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco não apresentaram diferença significativa e não se ajustaram aos modelos de regressão.

O nitrogênio apresentou respostas lineares decrescentes (FIGURA 28A). No tratamento de 0,04 cm³ cm⁻³ o teor de nitrogênio foi 18,5 g kg⁻¹ e no tratamento de 0,13 cm³ cm⁻³ o teor de nitrogênio foi de 17,6 g kg⁻¹, ou seja, ocorreu uma redução de 4,8 % no tratamento de 0,13 cm³ cm⁻³ em relação ao de menor porosidade de aeração,

O maior teor do nitrogênio na parte aérea das plantas de milho do tratamento de 0,04 cm³ cm⁻³ pode ser atribuído ao maior conteúdo de água no solo. Tendo em vista que o ar e água ocupam os poros do solo, quando há diminuição de um, inevitavelmente ocorre o aumento do outro. O maior conteúdo de água no solo refletiu na maior abertura estomática e

maior taxa de transpiratória (FIGURA 17B e 18A). Havendo perda de água das folhas para a atmosfera, gera-se um gradiente de potencial hídrico, que promove a absorção de água e nutrientes presentes no solo (KERBAUY, 2013).

Esse movimento de água no sistema solo-planta-atmosfera está associado ao mecanismo de absorção de nutrientes e, principalmente, com aqueles que são absorvidos por fluxo de massa, como é o caso do nitrogênio (RUIZ; MIRANDA; CONCEIÇÃO, 1999; RAIJ, 2011).

Segundo Raij (2011), 98% do suprimento de nitrogênio em plantas de milho para a produção de grãos é feita pelo mecanismo de fluxo de massa (os outros 2% estão associados com o processo de interceptação radicular). Isso é devido ao nitrogênio ser absorvido principalmente como nitrato, uma forma livre não adsorvida ao solo e, assim, acompanha a água que entra na planta.

Medeiros (2004), ao estudar plantas de arroz em diferentes condições hídricas, encontrou em seus resultados maiores teores de nitrogênio na parte aérea das plantas quando o solo estava com alto teor de umidade. O autor atribuiu esse fato, em partes, à maior taxa transpiratória.

É importante ressaltar que no presente trabalho, para o tratamento de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, mesmo apresentando os maiores teores de nitrogênio, isso não foi suficiente para melhorar a taxa fotossintética nesse tratamento (FIGURA 17A).

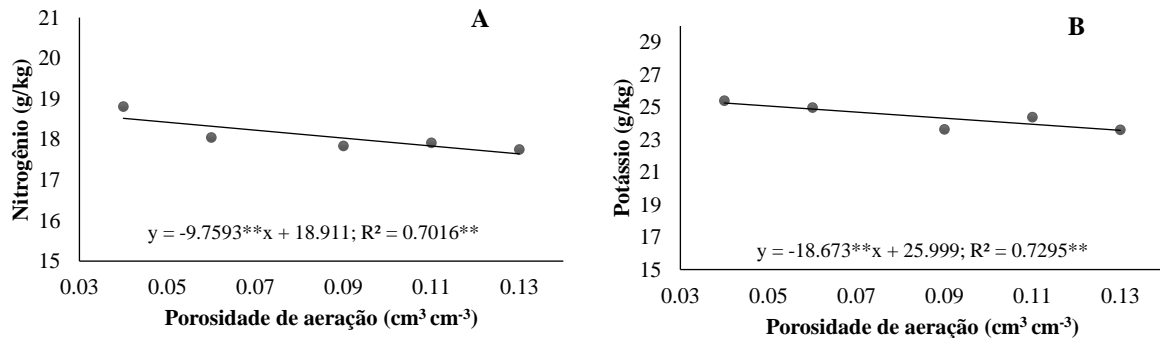
O tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ apresentou os menores teores de nitrogênio. Isso é explicado pelas condições do solo no horizonte B com caráter coeso. Nesse caso, a água retida em maior tensão (25 kPa) e a maior resistência do solo à penetração (TABELA 3), provavelmente induziu a superficialização do sistema radicular, diminuindo a absorção de água e nutrientes, no caso, o nitrogênio. A diminuição da absorção de água refletiu na menor abertura estomática, contribuindo, ainda mais, para a menor absorção desse nutriente, visto que a transpiração foi diminuída e, conseqüentemente, o processo de fluxo de massa também.

Sendo o nitrogênio um elemento estrutural de proteínas, nucleotídeos e lipídeos, além de ser um elemento regulatório de várias reações metabólicas na planta (KERBAUY, 2013), sua deficiência, nesse tratamento, provavelmente, influenciou nas funções supracitadas, o que refletiu na diminuição de variáveis como comprimento e diâmetro do colmo (FIGURAS 25A e 25B).

O potássio apresentou respostas lineares decrescentes (FIGURA 28B). O teor desse nutriente no tratamento de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ foi de $25,2 \text{ g kg}^{-1}$ e no tratamento de $0,13 \text{ cm}^3$

cm^{-3} foi de $23,6 \text{ g kg}^{-1}$, ocorrendo uma redução de 6,3% em relação à menor porosidade de aeração.

Figura 28 - Teores de nitrogênio (A) e potássio (B) na parte aérea de plantas de milho sob diferentes porosidades de aeração



Fonte: Elaborado pela autora

(**) nas equações de regressão indicam significância a 5 % de probabilidade

O maior teor de potássio na parte aérea das plantas de milho no tratamento de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ pode ser explicado, pelo menos em parte, pelo maior conteúdo de água nesse tratamento, visto que a menor porosidade de aeração implica no aumento do conteúdo de água no solo.

No caso do potássio, o principal mecanismo de absorção desse nutriente é a difusão. Quando ocorre o aumento do conteúdo de água no solo, há aumento da espessura do filme de água que reveste as partículas sólidas do solo, facilitando a absorção desse nutriente (COSTA *et al.*, 2009).

Oliveira, Rosolem e Trigueiro (2005) afirmam que no caso em que há restrição ao crescimento radicular, para o potássio, em que a sua absorção é predominantemente feita por difusão, o fluxo de massa passaria a ter grande importância no suprimento de potássio para a planta.

O tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ apresentou os menores teores de potássio. Esse fato pode ser explicado pelo maior volume de poros ocupados com ar nesse tratamento e, conseqüentemente, menor volume de poros com água.

No caso da difusão com a diminuição do conteúdo de água no solo a espessura da película de água que recobre as partículas de solo diminui, o que aumenta a tortuosidade do meio usado para que esse mecanismo aconteça. Com isso, há a diminuição da difusão do potássio no solo e, conseqüentemente, para a planta (COSTA *et al.*, 2009).

A diminuição da transpiração também influencia na absorção de potássio, uma vez que o processo de fluxo de massa representa cerca de 20 % na absorção desse nutriente em plantas de milho para a produção de grãos. Porém, a maior parte desse nutriente é absorvida via difusão, com 78 % (os outros 2% corresponde ao mecanismo de interceptação radicular) (RAIJ, 2011).

O potássio tem funções importantes nas plantas, tais com o alongamento celular, ativação de enzimas, síntese de proteínas, transporte de açúcares no floema (KERBAUY, 2013) que podem ter sido afetadas e refletidas na diminuição de variáveis como o comprimento e diâmetro da planta no tratamento de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (FIGURAS 26A e 26B).

5 CONCLUSÕES

Os resultados do presente trabalho indicam que a hipótese testada foi comprovada, uma vez que, de forma geral, nos solos com caráter coeso, as porosidades de aeração de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ diminuíram o desenvolvimento da cultura do milho.

A menor porosidade de aeração ($0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) acarretou no menor desenvolvimento de plantas de milho, sendo taxa fotossintética, crescimento do sistema radicular, diâmetro e comprimento do colmo as variáveis mais sensíveis para detectar o estado de hipóxia no solo no horizonte com caráter coeso e tais respostas estão ligadas a limitações não estomáticas.

Na maior porosidade de aeração ($0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), a taxa fotossintética, o comprimento e diâmetro do colmo foram afetados negativamente e mostraram-se sensíveis para detectar déficit hídrico leve no solo. Nesse caso, limitações estomáticas foram preponderantes para essas respostas.

Contudo, os tratamentos de porosidades de aeração intermediárias aos tratamentos supracitados permitiram o melhor desenvolvimento das plantas, visto que nesses tratamentos as variáveis como a fotossíntese, o comprimento e diâmetro do colmo foram maiores.

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, W. A. P. *et al.* Distribuição de frequência de tamanho da fração areia e compactidade relativa de solos desenvolvidos de sedimentos do grupo geológico barreiras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 1-9, 1998.
- AHMED, M. A.; PASSIOURA, J.; CARMINATI, A. Hydraulic processes in roots and the rhizosphere pertinent to increasing yield of water-limited grain crops: a critical review. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 69, n. 13, p. 3255-3265, 2018.
- ALBUQUERQUE, P. E. P.; RESENDE, M. **Cultivo do milho**: manejo da irrigação. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico, 47).
- ALENCAR, T. L. *et al.* Liquid bovine biofertilizer and cultivation effects on the porosity of a typic haplocambids as a function of cultivation and dose. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, p. 1-16, 2016.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. **Física do solo**: conceitos e Aplicações. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008.
- ARAI, M. **A grande elevação eustática do mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras**. **Geologia USP**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 1-6, 2006.
- ARAUJO FILHO, J. C.; CARVALHO, A.; SILVA, F. B. R. e. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil. *In*: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 123-142.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; CARVALHO, A.; SILVA, F. B. R. e. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil. *In*: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 123-142.
- ASSIS, R. L. *et al.* Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 558-568, 2009.
- BEZERRA, C. E. E. *et al.* Genesis of cohesive soil horizons from north-east Brazil: role of argilluviation and sorting of sand. **Soil Research**, Berlin, v. 53, n. 1, p. 43-55, 2014.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. *In*: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd. ed. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1986a. (Agronomy monography, 9). p. 75-363.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. *In*: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis**. 2 nd. ed. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1986b. (Agronomy Monography, 9). p. 377-382.

- BORDIN, V. *et al.* Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, n. 12, p. 1785-1792, 2008.
- BRADY, N. C. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: F. Bookman, 2013.
- BRANDÃO, R. D. L.; FREITAS, L. C. B. (org.). **Geodiversidade do estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2014.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria-Geral. **Projeto RadamBrasil**: folha SB 24/25 Jaguaribe/Natal; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 1981. (Levantamento de Recursos Naturais, 23).
- CHAVARRIA, G.; SANTOS, H. P. dos. Plant water relations: absorption, transport and control mechanisms. *In*: MONTANARO, G.; DICHIO, B. (org.). **Advances in selected plant physiology aspects**. Rijeka: Intech, 2012. v. 1. p. 105-132.
- CIFRE, J. *et al.* Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.) An open gate to improve water-use efficiency? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 106, n. 2/3, p. 159-170, 2005.
- CINTRA, F. L. D. Distribuição do sistema radicular na presença de horizontes coesos. *In*: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 229-239.
- CINTRA, F. L. D.; LIBARD, P. L.; SAAD, A. M. Balanço hídrico no solo para porta enxertos de citros em ecossistema de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 23-28, 2000.
- CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L. Caracterização física de uma classe de solo do ecossistema do tabuleiro costeiro. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55, n. 3, p. 367-378, 1998.
- CINTRA, F. L. D.; PORTELA, J. C.; NOGUEIRA, L. C. Caracterização física e hídrica em solos dos tabuleiros costeiros no distrito de irrigação platô de neópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 45-50, 2004.
- CINTRA, F. L. *et al.* Efeito de volumes de água de irrigação no regime hídrico de solo coeso dos tabuleiros e na produção de coqueiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1041-1051, 2009.
- COELHO, C. C. R. *et al.* Biometria em plantas de milho submetidas ao alagamento. **Revista Agroecossistemas**, Belém, v. 5, n. 1, p. 32-38, 2013.
- CORRÊA, M. M. *et al.* Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 297-313, 2008.

COSTA, J. P. V. da. *et al.* Fluxo difusivo de potássio em solos sob diferentes níveis de umidade e de compactação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 1, p. 56-62, 2009.

DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. *In*: KLUTE, A. (ed.). *Methods of soil analysis*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1986. (Agronomy Monography, 9). p. 443-461.

DANTAS, J. S. *et al.* Gênese de solos coesos do leste maranhense: relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1039-1050, 2014.

DUARTE, L. R. S. **Pedogênese de horizontes com caráter coeso em duas topossequências nos Tabuleiros Costeiros do Ceará**. 2015. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido. **Zoneamento agroecológico do Nordeste**: diagnóstico do quadro natural e agrossocioeconômico. Brasília, DF: Embrapa, 2000.

FALCHI, R. *et al.* Summer drought stress: differential effects on cane anatomy and non-structural carbohydrate content in overwintering Cabernet Sauvignon and Syrah vines. **BIO Web of Conferences**, Les Ulis, v. 13, p. 1-6, 2019.

FERREIRA, D. F. **SISVAR®**: Sistema de análise de variância para dados balanceados, versão 5.6. Lavras: DEX/UFLA, 2010. (Software estatístico).

FIGUEIRÔA, J. de; BARBOSA, D. C de. A.; SIMABUKURO, E. A. Crescimento de plantas jovens de *Myracrodruon urundeuva* Allemão (Anacardiaceae) sob diferentes regimes hídricos. **Acta Botanica Brasilica**, Alta Floresta, v. 18, n. 3, p. 573-580, 2004.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L de. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, n. 8, p. 947-953, ago. 2003.

FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P dos.; FONTANELI, R. S. Morfologia de gramíneas forrageiras. *In*: FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. dos.; FONTANELI, R. S. (eds.). **Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região sul-brasileira**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. p. 51-58.

GASPAR, M. Aquaporinas: de canais de água a transportadores multifuncionais em plantas. **Brazilian Journal of Botany**, São Paulo, v. 34, n. 4, p. 481-491, 2011.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. *In*: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1986. (Agronomy Monography, 9). p. 383-411.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-897, 1980.

GHANNOUM, O. C₄ photosynthesis and water stress. **Annals of Botany**, Oxford, v. 103, n. 4, p. 635-644, 2009.

GIAROLA, N. F. B. *et al.* Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting: estudo de caso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 239-247, 2001.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 3, p. 613-620, 2002.

GONÇALVES, R. C. **Comparação de alterações morfológicas e de desenvolvimento provocadas pelo alagamento em plantas de seis espécies arbóreas de leguminosae**. 2009. 37 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

GROENEVELT, P. H.; KAY, B. D.; GRANT, C. D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v. 34, n. 2, p. 101-114, 1984.

GRZESIAK, S. *et al.* Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 88, p. 2-10, 2013.

GRZESIAK, S. *et al.* The impact of limited soil moisture and waterlogging stress conditions on morphological and anatomical root traits in maize (*Zea mays* L.) hybrids of different drought tolerance. **Acta Physiologiae Plantarum**, Berlin, v. 21, n. 3, p. 305-315, 1999.

GUEDES FILHO, O. *et al.* Permeabilidade ao ar da cama de semeadura do solo em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 841-851, 2015.

HILLEL, D. **Environmental soil physical**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico de geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. (Manuais Técnicos em Geociências, 5).

JACOMINE, P. K. T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos tabuleiros costeiros. *In*: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 13-26.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2013.

KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. *Proceedings*. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 11, p. 93-99, 1946.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. *In*: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1986. (Agronomy Monography, 9). p. 635-662.

KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; KIRKSEN, C. **Elements of soil physics**. Amsterdam: Elsevier, 1983. (Developments in Soil Science, 13).

LAL, R. Soil management in the developing countries. **Soil Science**, Madison, v. 165, p. 57-72, 2000.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

LIBARD, L. P.; MELO FILHO, J. F. Influência dos horizontes coesos na dinâmica da água no solo. *In*: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 193-208.

LIBARDI, L. P.; MELO FILHO, J. F. Influência dos horizontes coesos na dinâmica da água no solo. *In*: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 193-208.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.

LIMA NETO, J. A. *et al.* Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos de latossolos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 473-486, 2010.

LIMA NETO, J. de A. *et al.* Caracterização e gênese do caráter coeso em latossolos amarelos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1001-1011, 2009.

LIMA, H. V de. **Identificação e caracterização do comportamento físico de solos coesos no estado do Ceará**. 2004. 85 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

LIMA, H. V. *et al.* Comportamento físico de um argissolo acinzentado coeso no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 33-40, 2005.

LIMA, H. V. *et al.* Identificação e caracterização de solos coesos no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 467-476, 2004.

LIMA, H. V. *et al.* Micromorphology and image analysis of a hardsetting Ultisol (Argissolo) in the state of Ceará (Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v. 132, n. 1, p. 416-426, 2006.

LIPIEC, J. *et al.* Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. **International Agrophysics**, Lublin, v. 17, n. 2, p. 61-69, 2003.

MAGALHÃES, P. C. *et al.* **Avaliação das modificações morfológicas radiculares durante os ciclos de seleção do milho Saracura tolerante a hipóxia**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 15).

MAGALHÃES, P. C. *et al.* **Fisiologia do Milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 22).

MAGALHAES, P. C.; DURAES, F. O. M.; GOMIDE, R. L. Fisiologia da cultura do milho. *In: BENASSI, A. C. et al. Manual técnico para a cultura do milho no Estado do Espírito Santo*. Vitória: EMCAPA, 1996. p. 15-34.

MARCELINO, A. M. T. **Caracterização dos ecossistemas costeiros dos Estados do Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí**. Natal: [s. n.], 1999. Disponível em: http://rodadas.anp.gov.br/arquivos/Round7/arquivos_r7/SISMICA_R7/refere/RegiaoNordeste_RGN_CE_PI.pdf. Acesso em: 10 set. 2019.

McQUEEN, D. J.; SHEPHERD, T. G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 63, n. 3/4, p. 93-107, 2002.

MEDEIROS, R. D de. **Efeitos da compactação do solo e da umidade sobre a absorção de n, p, k, os componentes de produção e a produtividade de grãos de arroz**. 2004. 162 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

MENEZES, A. F. **Morfologia e funcionalidade da rede porosa de horizontes com e sem caráter coeso em solos de Tabuleiro Costeiro**. 2016. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

MENEZES, A. S. *et al.* Functionality of the porous network of Bt horizons of soils with and without cohesive character. **Geoderma**, Amsterdam, v. 313, p. 290-297, 2018.

MORAIS, J. O. *et al.* Erosão e progradação do litoral brasileiro Ceará. *In: MUEHE, D. (org.). Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília, DF: MMA, 2006. p. 131-154.

MOREAU, A. M. S. dos S. *et al.* Gênese de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos do tabuleiro costeiro do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 1021-1030, 2006b.

MOREAU, A. M. S. S. *et al.* Caracterização de solos de duas toposseqüências em tabuleiros costeiros do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 1007-1019, 2006a.

MOTA, J. C. A. *et al.* Pore shape, size distribution and orientation in Bt horizons of two Alfisols with and without cohesive character from Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 15, p. e00197, 2018.

NUNES, F. C.; SILVA, E. F. da; VILAS-BOAS, G. da S. **Grupo Barreiras: características, gênese e evidência de neotectonismo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento/Embrapa Solos, 194).

- NUNES, J. A. S. **Desenvolvimento da cultura do milho sob níveis de densidade e tensões de água em Latossolo Vermelho de cerrado**. 2014. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2014.
- OLIVEIRA, R. H.; ROSOLEM, C. A.; TRIGUEIRO, R. M. Importância do fluxo de massa e difusão no suprimento de potássio ao algodoeiro como variável de água e potássio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 439-445, 2004.
- PACHECO, C. A. P. *et al.* **BRS 2022**: híbrido duplo de milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico, 174).
- PEREIRA, F. H. F. *et al.* Trocas gasosas em plantas de tomateiro submetidas a condições salinas. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 22, n. 2, 2004. Suplemento 2.
- PÉREZ-ZAMORA, O. *et al.* Tensión de humedad del suelo y fertilización nitrogenada en melón cantaloupe: segunda parte. **Agrociencia**, Mexico, v. 38, n. 3, p. 261-272, 2004.
- PEZESHKI, S. R. Wetland plant responses to soil flooding. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 46, n. 3, p. 299-312, 2001.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo dos nutrientes**. Piracicaba: International Plant Institute, 2011.
- RAMOS, M. R. *et al.* Influência da posição na encosta na manifestação do caráter coeso em solos da formação macacu, no estado do rio de janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 837-845, 2013.
- REICHARDT, K. **Solo, planta, atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri: Manole, 2012.
- REN, B. *et al.* Effects of waterlogging on the yield and growth of summer maize under field conditions. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 94, n. 1, p. 23-31, 2014.
- REN, B. Z. *et al.* Effects of spraying exogenous hormone 6-benzyladenine (6-BA) after waterlogging on grain yield and growth of summer maize. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 188, p. 96-104, 2016.
- REZENDE, J. O. **Solos coesos dos tabuleiros costeiros: limitações agrícolas e manejo**. Salvador: SEAGRI/SPA, 2000.
- RIBEIRO, K. D. *et al.* Propriedades físicas do solo influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007.
- RIBEIRO, L. P. Evolução da cobertura pedológica dos Tabuleiros Costeiros e a gênese dos horizontes coesos. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 93-121.

- ROBERTSON, D. *et al.* Waterlogging affects the growth, development of tillers, and yield of wheat through a severe, but transient, N deficiency. **Crop & Pasture Science**, Washington, DC, v. 6, p. 578-586, 2009.
- RODRIGUES, E. J. *et al.* Profundidade de raízes de milho safrinha em sucessão com soja em três sistemas de cultivos no norte do paraná. In: SEMINÁRIO NACIONAL MILHO SAFRINHA, 14., 2017, Cuiabá. **Anais [...]**. Cuiabá, 2017.
- RUIZ, H. A.; MIRANDA, J.; CONCEIÇÃO, J. C. S. Contribui o dos mecanismos de fluxo de massa e de difusão para o suprimento de k, ca e mg a plantas de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 1015-1018, 1999.
- S , M. A. C. de.; SANTOS JUNIOR, J. de D. G. dos. **Compacta o do solo**: consequências para o crescimento vegetal. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. (Embrapa Cerrados. Circular Técnica, 136).
- SANTANA, M. B. *et al.* Atributos físicos dos solos e distribui o do sistema radicular de citros como indicadores de horizontes coesos em dois solos de Tabuleiros Costeiros do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 1-12, 2006.
- SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classifica o de Solos**. 5. ed. rev. amp. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018.
- SAUTER, M. Root responses to flooding. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 16, n. 3, p. 282-286, 2013.
- SCALON, S. de P. Q.; MUSSURY, R. M. Estresse hídrico no metabolismo e crescimento inicial de mudas de mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 4, p. 655-662, 2011.
- SHABALA, S. *et al.* Root-to-shoot signalling: integration of diverse molecules, pathways and functions. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 43, n. 2, p. p. 87-104, 2015.
- SILVA, A. P. *et al.* Determina o da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1535-1545, 2009.
- SILVA, F. C. (ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa Informa o Tecnológica, 2009.
- SILVA, F. G. *et al.* Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de berinjela sob lâminas de irriga o. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 10, p. 946-952, 2015.
- SILVA, M. de A. *et al.* Photosynthetic capacity and water use efficiency in sugarcane genotypes subject to water deficit during early growth phase. **Brazilian Archives Biology Technology**, Curitiba, v. 56, n. 5, p. 735-748, 2013.

- SILVEIRA JUNIOR, S. D. da. S. *et al.* Qualidade física de um latossolo vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1854-1867, 2012.
- SILVEIRA, D. de C. *et al.* Relação umidade versus resistência à penetração para um argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 659-667, 2010.
- SILVEIRA, L. R. *et al.* Sistema de aquisição de dados para equipamento de medida da permeabilidade intrínseca do solo ao ar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 429-436, 2011.
- SOARES, L. A. dos A. *et al.* Respostas fisiológicas tomateiro na fase de floração sob estresse hídrico. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 51-55, 2012.
- SOUZA, L. D.; SOUZA, L. S.; LEDO, C A S. Sistema radicular dos citros em Neossolo Quartzarênico dos Tabuleiros Costeiros sob irrigação e sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 10, p. 1373-1381, 2007.
- SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D.; CALDAS, R. C. Identificação da coesão com base em atributos físicos convencionais em solos dos Tabuleiros Costeiros. *In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS*, 2001, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 169-190.
- TABLE CURVE 2D. Table Curve 2D (Trial Version 5.01). *In: SYSTAT SOFTWARE. Products*. San Jose, 2014. Disponível em: <http://www.sigmaplot.com/products/tablecurve2d/tablecurve2d.php>. Acesso em: 30 set. 2017.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.
- TIAN, L. *et al.* Effects of waterlogging stress at different growth stages on the photosynthetic characteristics and grain yield of spring maize (*Zea mays* L.) Under field conditions. **Agricultural Water Management**, Rotterdam, v. 218, p. 250-258, 2019.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.
- VIEIRA, J. M. **Contribuição de compostos de baixa cristalinidade e ciclos de umedecimento e secagem na gênese do caráter coeso em solos do Ceará**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- VIEIRA, J. M. *et al.* Contribuição de material amorfo na gênese de horizontes coesos em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 43, n. 4, p. 623-632, 2012.
- VU, J. C. V.; YELENOSKY, G. Photosynthetic responses of rough lemon and sour orange to soil flooding, chilling and short-term temperature fluctuation during growth. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 32, n. 4, p. 471-477, 1992.

WANG, T. *et al.* On the use of the similar media concept for scaling soil air permeability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 235/236, p. 154-162, 2014.

YORDANOVA, R. Y.; POPOVA, L. P. Flooding-induced changes in photosynthesis and oxidative status in maize plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, Berlin, v. 29, n. 6, p. 535-541, 2007.

YOUN, J. T. *et al.* Waterlogging effects on nitrogen accumulation and N₂ fixation of supernodulating soybean mutants. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, Seoul, v. 11, n. 2, p. 111-118, 2008.

ZHANG, L. *et al.* Rubisco gene expression and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings in response to water deficit. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 1061, p. 81-87, 2013.

ZONTA, E. *et al.* O sistema radicular e suas alterações com o ambiente edáfico. *In*: FERNADES, M. S. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. 2. ed. Voçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018. p. 8-52.