



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA:
SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS**

PRISCILLA ALVES DA COSTA

**PEDOGÊNESE DE UM SOLO CALCÁRIO E ALTERAÇÕES DE SEUS ATRIBUTOS
EM RESPOSTA A IRRIGAÇÃO**

**FORTALEZA
2012**

PRISCILLA ALVES DA COSTA

**PEDOGÊNESE DE UM SOLO CALCÁRIO E ALTERAÇÕES DE SEUS ATRIBUTOS EM
RESPOSTA A IRRIGAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas, do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Osório Ferreira

FORTALEZA

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

C875p

Costa, Priscilla Alves da.

Pedogênese de um solo calcário e alterações de seus atributos em resposta a irrigação.

/ Priscilla Alves da Costa. – 2012.

115 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Ciências do Solo, Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas, Fortaleza, 2012.

Área de Concentração: Solos e nutrição de plantas.

Orientação: Prof. Dr. Tiago Osório Ferreira.

1. Irrigação. 2. Carbonato de cálcio. 3. Mineralogia do solo. 4. Estrutura do solo. I. Título.

CDD 631.4

PRISCILLA ALVES DA COSTA

PEDOGÊNESE DE UM SOLO CALCÁRIO E ALTERAÇÕES DE SEUS ATRIBUTOS EM
RESPOSTA A IRRIGAÇÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas, do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Aprovada em : ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Tiago Osório Ferreira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

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

Prof. Marcelo Metri Correa
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

A Deus,

OFEREÇO

À minha mãe **Liduína Alves da Costa** por seu extenso amor e carinho, por toda dedicação e pela educação a mim concedida que vai além de uma sala de aula.

Ao meu esposo **Fellipe Barbosa da Silva**, por todo amor, incentivo, apoio, carinho e compreensão.

A vocês...

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, por me conceder sabedoria e guiar meus caminhos.

Aos meus familiares em especial as minhas tias Eliane e Helena, por todo carinho e pelo incentivo.

Aos meus amigos Daniel Pontes (coxa) por toda ajuda e amizade; Carol Araújo pelos anos de amizade e por sempre estar disposta a me ajudar; Isabel Cristina pelos momentos de descontração e amizade.

Aos meus sogros Raimundo Nonato e Marli Barbosa por serem como pais para mim e pelo acolhimento.

Ao Prof. Tiago Osório Ferreira pela excelente orientação, por todos os ensinamentos, amizade e por sempre ter acreditado em mim, sou muita grata.

Ao Prof. Jaedson Cláudio Anunciato Mota pelos ensinamentos, amizade, por ter me ajudado no desenvolvimento deste trabalho e por sempre estar disposto a ajudar, meu muito obrigado.

Ao Prof. Ricardo Espíndola Romero, por ter ajudado na etapa de campo, pelos ensinamentos e pela amizade.

Ao Prof. Miguel Cooper por ter me acolhido durante o semestre em que estive na ESALQ/USP.

Ao Prof. Valdomiro Severino de Souza Júnior por ter me ajudado com a análise mineralógica e ter me recebido de maneira acolhedora na UFRPE.

Ao Prof. Marcelo Metri Corrêa por ter aceitado participar da banca examinadora e por ter contribuído com a análise mineralógica.

Aos meus colegas do Departamento de Ciências do Solo UFC, Fabiana Gadelha pela ajuda nas análises de laboratório; Dimitri Matos pelo auxílio na análise estatística e nas análises de laboratório; Alcione Guimarães pela ajuda na coleta de solo e por sempre me auxiliar com as análises físicas; Leilson de Carvalho por ter ajudado na etapa de campo; Thales Pantaleão por ter me auxiliado nos gráficos de mineralogia.

Aos colegas do grupo de pedologia em especial Ana Leônia, Gabriel Nuto, Gislaine Marques, Juliana Matos, Lílian Rafaelly, Kezia Mendes, Mirele Paula, Leo Jackson e Adriana Guirado, pelos momentos de descontração, amizade e troca de conhecimento.

Aos meus amigos Renata Almeida, Ericsson Almeida, Sara Montenegro, Victor Montenegro, Daniel Gonzaga, Sandra Isabel e MaryEdy Meireles, pelas orações, amizade e por todos os momentos de descontração.

As colegas Eloise Mello e Juliet Emília da UFRPE por terem me ajudado na mineralogia.

Aos colegas Selene Castilho, Mariana Delgado e Raul Shiso pelo acolhimento durante o período em que estive na ESALQ/USP.

Aos funcionários da FUNCEME, Antônio José e José Tavares, pelo auxílio nas análises e por sempre estarem dispostos a ajudar.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), ao Departamento de Ciências do Solo e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade da realização do curso de Mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos e por ter possibilitado a minha ida à ESALQ via Programa de Cooperação Acadêmica (PROCAD125/07).

Ao proprietário rural Sr. Luiz Prata Girão, por ter concedido a área para realização dos estudos.

A todos, que direta ou indiretamente, independente da função, grau de parentesco e ou instrução, contribuíram neste percurso. Sempre terão meus reconhecimentos e estarão em meus pensamentos. Muito obrigada!

"O solo não é uma herança que recebemos de nossos pais, mas sim um patrimônio que tomamos emprestado de nossos filhos"
Lester Brown

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	12
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
2	CAPÍTULO 1: CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E MICROMORFOLOGICA DE DOIS PERFIS DE SOLOS CALCÁRIOS DO SEMIARIDO CEARENSE: O EFEITO DA IRRIGAÇÃO	16
	RESUMO	16
	ABSTRACT	17
2.1	INTRODUÇÃO	18
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	20
2.2.1	<i>Localização e histórico das áreas de estudo</i>	20
2.2.2	<i>Amostragem</i>	21
2.2.3	<i>Procedimentos analíticos</i>	22
2.2.3.1	<i>Análises químicas</i>	22
2.2.3.2	<i>Análises físicas</i>	23
2.2.3.3	<i>Análise mineralógica</i>	24
2.2.3.4	<i>Análise micromorfológica</i>	24
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
2.3.1	<i>Atributos morfológicos</i>	25
2.3.2	<i>Atributos físicos e químicos</i>	26
2.3.3	<i>Classificação dos perfis</i>	35
2.3.4	<i>Mineralogia da fração argila e silte</i>	36
2.3.5	<i>Micromorfologia</i>	43
2.4	CONCLUSÕES	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
3	CAPÍTULO 2: ALTERAÇÕES EM ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS CALCÁRIOS DO SEMIÁRIDO CEARENSE APÓS VINTE E TRÊS ANOS DE IRRIGAÇÃO	59
	RESUMO	59
	ABSTRACT	60
3.1	INTRODUÇÃO	61
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	63
3.2.1	<i>Localização e histórico das áreas de estudo</i>	63
3.2.2	<i>Amostragem</i>	64
3.2.3	<i>Procedimentos analíticos</i>	65
3.2.3.1	<i>Análises químicas</i>	65
3.2.3.2	<i>Análise estatística</i>	66
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
3.3.1	<i>Atributos químicos</i>	67
3.3.2	<i>Análise dos componentes principais (ACP)</i>	72
3.4	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
4	CAPÍTULO 3: ALTERAÇÕES FÍSICAS EM UM SOLO IRRIGADO POR VINTE E TRÊS ANOS NA CHAPADA DO APODI, CEARÁ	79
	RESUMO	79
	ABSTRACT	80
4.1	INTRODUÇÃO	81
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	83

4.2.1	<i>Localização e histórico das áreas de estudo</i>	83
4.2.2	<i>Amostragem</i>	84
4.2.3	<i>Procedimentos analíticos</i>	85
4.2.3.1	<i>Análises físicas</i>	85
4.2.3.2	<i>Análise estatística</i>	88
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
4.3.1	<i>Textura, densidade das partículas, densidade do solo, estabilidade de agregados e resistência do solo a penetração</i>	90
4.3.2	<i>Porosidade do solo</i>	94
4.3.3	<i>Permeabilidade do solo ao ar</i>	96
4.3.4	<i>Índices de continuidade de poros</i>	100
4.3.5	<i>Análise dos componentes principais (ACP)</i>	102
4.4	CONCLUSÕES	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
	ANEXOS	112
	ANEXO I	112
	ANEXO II	115

RESUMO

A água é um recurso natural de valor inestimável. Mais que um insumo indispensável à produção é um recurso estratégico para o desenvolvimento econômico. A região semiárida, assim como o resto mundo, sofre cada vez mais com as alterações climáticas, associadas ao aquecimento global. Essas mudanças climáticas têm impactos tanto na oferta como na demanda por água nessa região. Na região Nordeste do Brasil, onde há uma distribuição irregular de chuvas, a produção agrícola é substancialmente melhorada através do uso da irrigação. A adoção do uso da irrigação nessas regiões semiáridas causa modificações no regime de umidade dos solos e pode ainda alterar suas propriedades e processos. O objetivo deste trabalho foi investigar os efeitos causados durante 23 anos de irrigação sobre solos calcários no semiárido cearense, com ênfase no estudo das alterações pedogenéticas proporcionadas pelo uso dessa prática. As áreas escolhidas para o estudo estão localizadas no perímetro irrigado localizado na Chapada do Apodi no município de Limoeiro do Norte-CE. Foram realizadas 8 tradagens em cada área (na área irrigada e na área externa e limítrofe ao pivô). Posteriormente, em cada uma das áreas, foram abertas trincheiras para realização das descrições morfológicas e coleta de amostras de solo para fins de caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica. Os resultados referentes às tradagens indicam terem ocorrido diferenças significativas na área irrigada quando comparada à área não irrigada, sendo verificadas a intensificação da dissolução de CaCO_3 e o aumento dos teores de cálcio, sódio e fósforo. Além disso, o solo irrigado sofreu alterações dos seus atributos físicos, sendo verificado aumento da sua densidade de partículas, diminuição da permeabilidade do solo ao ar e a formação de poros menos contínuos. Os resultados das análises dos perfis mostraram que os 23 anos de irrigação tiveram efeito no solo irrigado, tornando-o mais evoluído em comparação ao não irrigado, isso foi verificado através dos resultados obtidos na morfologia com aumento da espessura do solum, na física com a menor relação silte/argila e maior conteúdo argila nesse solo, na mineralogia com indícios de aumento da caulinita e neoformação de minerais interstratificados e na micromorfologia com o maior grau de pedalidade. O solo irrigado foi classificado como Chernossolo Háptico carbonático saprolítico, por apresentar horizonte A chernozênico seguido de horizonte B incipiente e possuir argila de atividade alta.

Palavras-chave: irrigação, carbonato de cálcio, mineralogia e micromorfologia.

ABSTRACT

Water is a priceless natural resource. More than an essential input to production is a strategic resource for economic development. The semiarid region, as well as the rest of the world, suffer more with climate change associated with global warming. These climate changes have impacts on both supply and demand for water in this region. In northeastern Brazil, where there is an uneven distribution of rainfall, agricultural production is substantially improved through the use of irrigation. The adoption of the use of irrigation in these semiarid regions leads to changes in soil moisture regime and may even change its properties and processes. The objective of this study was to investigate the effects during 23 years of irrigation on calcareous soils in semiarid Ceará, with emphasis on the study of pedogenetic changes provided by this practice. The areas chosen for study are located in Chapada do Apodi located in the city of Limoeiro do Norte - Ce. 8 amostragens were performed in each area (in the irrigated area and the area outside and adjacent to the pivot). Subsequently, in each of the areas, trenches were opened to perform the morphological descriptions and collected soil samples for physical characterization, chemical, mineralogical and micromorphological. The results indicate significant differences have occurred in the irrigated area compared to non-irrigated area, and verified the increased dissolution of CaCO_3 and increased levels of calcium, sodium and phosphorus. Furthermore, the flooded soil has changed its physical characteristics, and found an increase in density of particles decreased permeability of the soil air and the formation of pores less continuous. The analysis results showed that the profiles of 23 years of irrigation had effect on irrigated soil, making it more evolved in comparison to non-irrigated, it was verified by the results obtained in morphology with increasing soil thickness in physics with a lower silt / clay ratio and higher clay content in soil, mineralogy with evidence of increased neoformation of kaolinite and interstratified minerals, in micromorphology with the highest degree of pedalidade. The irrigated soil was classified as Chernosol by presenting chernozêmico horizon followed by an incipient B horizon and possess high activity clay.

Keywords: irrigation, calcium carbonate mineralogy and micromorphology.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A água é um dos importantes fatores de produção na agricultura. O uso de maneira adequada desse recurso pode conduzir excelentes resultados na produção agrícola, em contrapartida seu mau uso acarreta degeneração do meio físico natural (PAZ *et al.* 2000).

A região semiárida, assim como o resto mundo, sofre cada vez mais com as alterações climáticas (em padrões de precipitação e temperatura) associadas com o aquecimento global. Essas mudanças climáticas, sem dúvida, têm impactos tanto na oferta como na demanda por água.

Estudos indicam que a temperatura do planeta pode aumentar cerca de 1,1°C a 2,9°C até 2100 e em pior situação esse aumento poderá ser de 2,4°C a 6,4°C (FRANÇA, 2008). Este acontecimento terá efeitos diretos na agricultura causando queda na produção de alimento, principalmente nos países que já sofrem com a escassez de água.

O crescente consumo de água aliado ao aquecimento global e às alterações climáticas verificadas nos últimos anos e previstas para os próximos, devem intensificar o número de áreas áridas e semiáridas no mundo, extrapolando os mais 40% da superfície da terra já ocupados por estas áreas (DEICHMANN; EKLUNDH, 1991). Deverá ser observado ainda uma intensificação do processo de desertificação. Anualmente áreas do tamanho de 2000 km² se transformam em deserto devido à falta de chuvas. Estudos indicam que cerca de 36% do Brasil apresenta risco de desertificação, encontrando-se já 28% desta área, afetada por esse fenômeno. Uma área maior do que o estado do Ceará já foi atingida pela desertificação de forma grave no Nordeste (SÁ *et al.* 2010).

Diante deste cenário, o uso dos recursos hídricos será cada vez mais empregado, acarretando no aumento das áreas irrigadas nessas regiões com o objetivo de garantir a produção de alimento.

Estima-se que o consumo de água por meio da irrigação a nível mundial seja de 69% (CHRISTOFIDIS, 2012). No Brasil, quase a metade da água consumida destina-se a agricultura irrigada (CARDOSO *et al.* 1998) e são encontrados aproximadamente 4,5 milhões de hectares de áreas irrigadas no país (CHRISTOFIDIS, 2002). A região Nordeste possui 22,1% de toda área irrigada do país (PAULINO *et al.* 2011).

Com o passar dos anos a expansão da agricultura irrigada no planeta se tornará algo preocupante, tanto em relação ao desperdício de água, com também as consequências, muitas vezes irreversíveis, desse recurso no solo.

No Nordeste, onde ocorre uma distribuição irregular de chuvas e onde a sobrevivência e o crescimento das plantas são limitados pela falta de água disponível, a produção agrícola é substancialmente melhorada através da irrigação. A adoção do uso da irrigação nessas regiões semiáridas causa modificações no regime de umidade dos solos dessas áreas e pode causar vários efeitos sobre propriedades e processos dos solos contribuindo para alterações em sua pedogênese (PRESLEY *et al.* 2004).

Dados indicam que a produtividade dos solos irrigados supera em mais de duas vezes a produtividade das áreas em sequeiro (BANCO MUNDIAL, 2008).

No entanto, a irrigação altera o edafoclima natural do solo podendo acarretar alterações em atributos que se correlacionam com o clima do solo como, por exemplo teor de matéria orgânica, conteúdo e tipo de minerais de argila, cor, presença ou ausência de carbonato de cálcio e outros sais solúveis (BIRKELAND, 1999).

A irrigação pode modificar as características químicas e a dinâmica dos nutrientes no solo intensificando as perdas de nutrientes pelo processo de lixiviação (REICHARDT, 1998).

No tocante à agricultura irrigada, destaca-se no nordeste brasileiro a região da Chapada do Apodi que se situa na divisa dos Estados do Ceará e Rio Grande do Norte, o qual consiste em um pólo de exploração agrícola que vem expandindo a agricultura por intermédio do uso da irrigação. Os solos da Chapada do Apodi são caracterizados por serem originados de rochas calcárias, possuem uma boa fertilidade natural e geralmente eutróficos.

Muitos estudos têm sido feitos sobre os efeitos da irrigação nas propriedades químicas de solos, entretanto, poucos são aqueles que avaliam os efeitos desta atividade sobre a gênese dos solos e suas as propriedades morfológicas (tanto na macro como na micro escala) e sobre sua constituição mineralógica.

Tendo em vista o difundido uso da irrigação em regiões áridas e semiáridas, aliado ao aumento das áreas irrigadas devido ao aquecimento global, o estudo da influência dessa prática sobre a gênese e a constituição de solos torna-se indispensável, como ferramenta para a predição de seus possíveis efeitos em longo prazo.

Com base no que foi exposto, o presente estudo parte da hipótese de que em solos do semiárido, onde a prática de irrigação é empregada há vários anos, há alteração dos atributos do solo e da intensidade de determinados processos de formação do solo (por exemplo: argiluviação e dissolução de feições carbonáticas) e das condições de estabilidade de determinados argilominerais.

Neste sentido, objetivou-se investigar os efeitos causados por 23 anos de irrigação sobre solos calcários do semiárido cearense, com ênfase no estudo das alterações pedogenéticas proporcionadas pelo uso dessa prática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANCO MUNDIAL. Banco Internacional de Reconstrução e desenvolvimento. Relatório sobre o desenvolvimento mundial de 2008. **Agricultura para o desenvolvimento**. Washington D.C. 34 p., 2008.
- BIRKELAND, P.W. Soils and geomorphology. 3rd ed. **Oxford University Press**, New York, 1999.
- CARDOSO, H.E.A.; MANTOVANI, E.C.; COSTA, L.C. As águas da agricultura. Agroanalysis. **Instituto Brasileiro de Economia/Centro de Estudos Agrícolas**. Rio de Janeiro. 1998.p.27-28.
- CHRISTOFIDIS, D. **A água e a crise alimentar**. Disponível em: <[http://www.iica.org.br/Aguatab/Demetrios% 20Christofidis/P2TB01.htm](http://www.iica.org.br/Aguatab/Demetrios%20Christofidis/P2TB01.htm)>. 1997. Acesso em: 15 de fevereiro de 2012. 14p.
- CHRISTOFIDIS, D. **Considerações sobre conflitos e uso sustentável em recursos hídricos, em Conflitos e uso sustentável dos recursos naturais**. Suzi Huff Theodoro (org), Brasília: Garamont, 2002.
- DEICHMANN, U., EKLUNDH, L., 1991. Global Digital Datasets for Land Degradation Studies: A GIS Approach. GRID Case Study Series 4.
- FRANÇA, M. S. J. **Relatório de comissão ONU mostra que o Planeta está aquecendo e que a ação humana é determinante para isso**. 2008. Disponível em: http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/ambiente/conteudo_262600.shtml Acesso em: Abril de 20012.
- PAULINO, J., FOLEGATTI, M. V., ZOLIN, C. A., RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M., JOSÉ, J. V. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 2, p. 163-176, abril-junho, 2011. ISSN 1808-3765.
- PAZ, V.P.S.; TEODORO, R.E.F.; MENDONÇA, F.C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.465-473, 2000.
- PRESLEY, D. R.; RANSOM, M. D.; KLUITENBERG, G. J.; FINNELL, P. R. Effects of thirty years of irrigation on the genesis and morphology of two semiarid soils in Kansas. **Soil Science Society of America**, v.68, p. 1916-1926, 2004.
- REICHARDT, K. Irrigação. In: A água em sistemas agrícolas. São Paulo: Manole, 1990. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, 583 - 593, 1998.
- SÁ, I. B., CUNHA, T. J. F., TEIXEIRA, A. H. C., ANGELOTTI, F., DRUMOND, M. A., **Desertificação no Semiárido brasileiro**. ICID+18, 16-20 de Agosto de 2010, Fortaleza - Ceará, Brasil.

2 CAPÍTULO 1: CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E MICROMORFOLÓGICA DE DOIS PERFIS DE SOLOS CALCÁRIOS DO SEMIARIDO CEARENSE: O EFEITO DA IRRIGAÇÃO

RESUMO

A água participa com grande intensidade de vários processos do sistema solo, sendo responsável pelo transporte de solutos, dissolução de minerais e interferindo de forma direta na sua gênese. Com a expansão de áreas irrigadas na região Nordeste, fica cada vez mais necessário o estudo de como essa técnica poderá interferir no recurso solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar os impactos causados por 23 anos de irrigação sob a gênese, mineralogia e micromorfologia de um solo localizado na Chapada do Apodi, Ceará. Em campo foram abertas duas trincheiras, sendo uma dentro de área irrigada e outra na área externa e limítrofe ao pivô (área não irrigada). Nos perfis destas trincheiras, foram realizadas as descrições morfológicas e coleta de amostras para caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica. Com base nos resultados encontrados, verificou-se no solo sob influência da irrigação apresentou-se mais evoluído em comparação ao não irrigado, com maior espessura do solum, maior teor de argila em relação ao de silte, menor relação silte/argila, dissolução de carbonato de cálcio, indícios de imtemperização de minerais, maior grau de pedalidade. Foi verificado também neste solo a presença de superfícies de compressão que corroboram com a maior presença de fábricas birrefringentes. A classificação do solo irrigado mudou, sendo o mesmo classificado com Chernossolo Háptico carbonático saprolítico, por apresentar horizonte A chernozêmico seguido de horizonte B incipiente e possuir argila de atividade alta.

Palavras-chave: classificação, mineralogia e micromorfologia.

ABSTRACT

Water participates in various processes of soil being responsible for the transport of solutes, mineral dissolution and interfering directly in its genesis. With the expansion of irrigated areas in the Northeast, it is increasingly necessary to consider how this technique can affect the soil resource. The objective of this study was to evaluate the impacts of irrigation for 23 years in the genesis, mineralogy and morphology of the soil located in Chapado do Apodi, Ceará. In the field opened two trenches, one within the irrigated area and another area adjacent to the pivot and external (non-irrigated area). In the profiles of these trenches, the morphological descriptions were made and samples collected for physical, chemical, mineralogical and micromorphological. Based on these results found, in the soil under the influence of irrigation presented more advanced against the non-irrigated, more soil thickness, a higher level in relation to the clay silt, lower silt/clay ratio, dissolution of calcium carbonate, indications imtemperização of minerais, greater and greater degree of pedicidade. Verificado this soil was also the presence of surface compression that corroborate the presence of higher plants birefringent. The irrigated soil classification has changed, the same being awarded Chernosol by presenting chernozêmico horizon followed by an incipient B horizon and possess high activity clay.

Keywords: classification, mineralogy and micromorphology.

2.1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural de valor inestimável e essencial a todas as formas de vida. Por ser um fator tão importante a água torna-se indispensável para a produção agrícola, com isso várias técnicas são utilizadas para garantir essa produção, dentre elas destaca-se a irrigação. No entanto essa prática só é sustentável se realizada de maneira adequada, promovendo a eficiência no uso do solo e a diminuição dos impactos ambientais (LACERDA; OLIVEIRA, 2007).

A prática de irrigação é conhecida mundialmente como a maior usuária de água doce, sendo responsável pelo consumo de 69% (CHRISTOFIDIS, 2007). No Brasil segundo informações da ANA (2007), a distribuição percentual do volume consumido entre os setores da sociedade são: agricultura irrigada 46%, consumo urbano 27% e indústria 18%. Mantovani *et al.* (2007) relatam estimativas de que a área cultivada e irrigada no Brasil é responsável por 16% da produção total e 35% do valor econômico da produção.

Desta forma, num mundo onde vários países aderiram à prática da irrigação e onde já utilizam cerca de toda sua área agricultável, a agricultura irrigada torna-se um grande potencial produtivo de alto valor econômico e fundamental para a produção de alimentos. Como exemplo da inserção desta prática com o intuito de evitar a perda da produção das culturas tem a região Nordeste do Brasil, que se encontra inserida no polígono das secas e se caracteriza por possuir clima semiárido desfavorável à agricultura, e ter como principal suporte agrícola o uso da irrigação.

Como se vê a irrigação proporciona bons resultados no que diz respeito à produção agrícola, no entanto, assim como a grande maioria das atividades humanas, esta prática gera consequências negativas sobre as propriedades do solo. Segundo Correa *et al.* (2009), a agricultura irrigada em regiões semiáridas pode afetar a qualidade do solo, incluindo risco de degradação, salinização e a sodificação. Estudos mostram que a irrigação acelera o processo de acidificação do solo através da lixiviação de cátions de reação básica (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+) (WIETHÖLTED, 1997). Sabe-se também que a irrigação através da adição de água participa com grande intensidade de vários processos do sistema solo, sendo responsável pelo transporte de solutos, dissolução de minerais e, portanto, interferindo de forma direta na pedogênese.

De fato estudos recentes (PRESLEY *et al.* 2004) sugerem que anos de irrigação podem aumentar as taxas de intemperismo mineral e condicionar a formação de novos

horizontes. Tendo em vista que o número de áreas áridas e semiáridas no mundo deverão aumentar em resposta ao cenário de aquecimento global verificadas nos últimos anos, estudos voltados aos efeitos da irrigação sobre a pedogênese são ferramentas importantes não só para prever as consequências da atividade em si como também para predição dos efeitos das mudanças climáticas sobre intemperismo e as taxas de formação de solo.

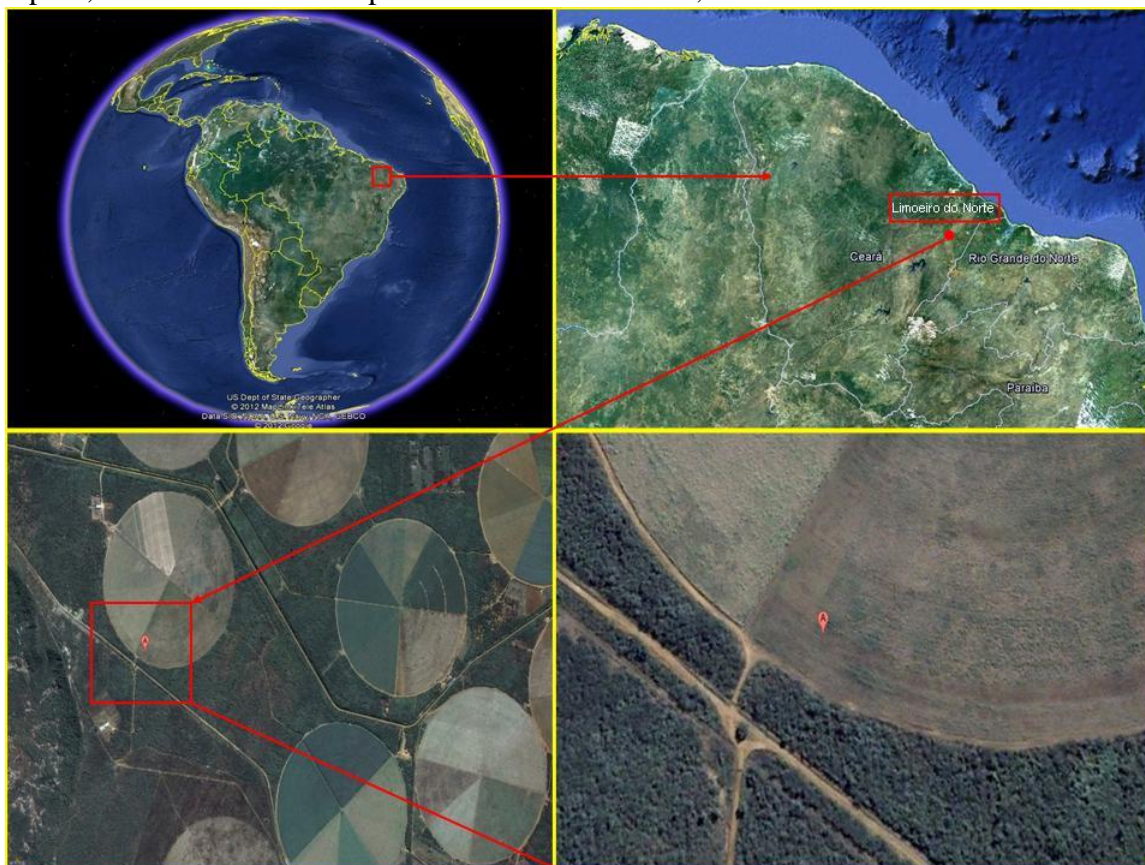
Diante deste contexto, levantou-se a hipótese de que em um solo do semiárido onde a irrigação é empregada há vários anos, favorece a ocorrência de modificações em seus atributos químicos e físicos como também na sua gênese. Portanto o objetivo do presente trabalho foi avaliar os impactos causados por aproximadamente vinte e três anos de irrigação sob a gênese, mineralogia e micromorfologia de um solo Localizado na Chapada do Apodi, Ceará.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Localização e histórico das áreas de estudo

As áreas escolhidas para o estudo estão localizadas no perímetro irrigado na Chapada do Apodi no município de Limoeiro do Norte-CE (Figura 1). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo BSw'h', caracterizado por ser muito quente e semiárido (BRASIL, 1973). A temperatura média anual é de 28,5 °C, com mínima de 22 °C e máxima de 35 °C. A precipitação média anual é 772 mm, registrando-se uma distribuição de chuvas muito irregular no tempo. A umidade relativa média é de 62% e a evapotranspiração atinge a média anual de 3.215 mm (DNOCS, 2012).

Figura 1 – Imagem de satélite das áreas avaliadas no perímetro irrigado da Chapada do Apodi, localizada no município de Limoeiro do Norte, Ceará.



Fonte: Google Earth.

A Chapada do Apodi faz parte da bacia Potiguar, onde as unidades estratigráficas estão representadas predominantemente pela formação do calcário Jandaíra com espessura média de 250 a 300 m no topo e pelo arenito Açú, na base (FEITOSA, 1996). O suprimento hídrico do perímetro é assegurado pelo rio Jaguaribe, perenizado pelo Açude de Orós, com capacidade de 2.100.000.000 m³ e derivação por meio da barragem de Pedrinhas, no Rio Quixeré. Além disso, existe um grande número de poços que são fonte de abastecimento de água potável para comunidades urbanas e rurais na região (MORAIS *et al.* 2005).

Para o presente estudo foram avaliadas duas áreas: área cultivada com capim que é irrigada por sistema de aspersão tipo pivot central (05°12'26,3" S e 38°02'30" W), e uma área externa e limítrofe ao pivô que não recebe irrigação (05°12'27,5 S e 38°02'30,7" W), distantes 40 metros uma da outra.

A área de pivô é irrigada durante 12 horas por dia, recebendo aproximadamente 0,44 mm/h, dando um total de 5,28 mm por dia e 1.927,2 mm por ano. Considerando-se a média histórica de precipitações pluvias dos últimos 25 anos que foi de 748,7 mm, tem-se que por ano são aplicados via irrigação e precipitação pluvial um total de 2.675,9 mm na área irrigada.

Na área irrigada os animais permanecem por 12 horas diariamente e a área não irrigada é usada como descanso e circulação para eles, sendo observado que na mesma, assim como a área irrigada, encontra-se gramínea como vegetação. A área de capim possui 50 ha, e é cultivada há 10 anos com capim tifton (*Cynodonniemfluesis*) e irrigada há aproximadamente 23 anos. A adubação química é feita por fertirrigação com ureia e superfosfato simples, sendo a ureia aplicada a cada ciclo de pastejo. A adubação orgânica é realizada com o esterco dos animais na própria área. Há utilização de máquinas na ocasião da fenação: roçadeira, enleiradeira, enfardadeira e tratores. A área foi anteriormente cultivada com milho por cerca de 5 anos.

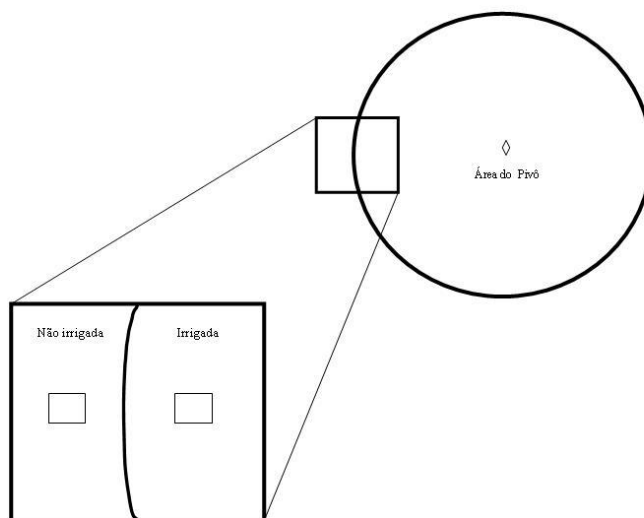
2.2.2 Amostragem

Em cada uma das áreas destinadas para o estudo, foi aberta uma trincheira (Figura 2). Nos perfis destas trincheiras, foram realizadas as descrições morfológicas e coleta de amostras para caracterização física, química (SANTOS *et al.*, 2005) mineralógica. Amostras com estrutura indeformada também foram coletadas para serem

feitas as análises micromorfológicas. Os perfis foram classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).

As amostras dos horizontes foram coletadas em sacos plásticos, identificadas, colocadas para secar em casa de vegetação, e em seguida destorroadas e peneiradas em tamis de malha de 2,0 mm, obtendo-se terra fina seca ao ar (TFSA).

Figura 2. Esquema mostrando o plano de amostragem que foi utilizado nas áreas de estudo. Os quadrados indicam as trincheiras



Fonte: Arquivo pessoal.

2.2.3 Procedimentos analíticos

2.2.3.1 Análises químicas

As análises químicas realizadas seguiram a metodologia descrita no Manual de Análises de Solo (EMBRAPA, 1997).

O pH em água e em cloreto de potássio (KCl 1 M) foram determinados potenciométricamente por meio de eletrodo imerso em suspensão solo: líquido, na relação 1: 2,5.

Os cátions cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) trocáveis foram extraídos por cloreto de potássio (KCl 1 M) e determinados por compleximetria. O potássio (K^+) e o sódio (Na^+) trocáveis foram extraídos com solução de Mehlich 1 e determinados por

espectrofotômetro de chama. Nesse último extrato o fósforo foi ainda determinado por espectrofotometria.

O alumínio, (acidez trocável), foi extraído com solução de cloreto de potássio (KCl 1M) e determinado por complexiometria. O alumínio e o hidrogênio, acidez potencial ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ no solo), foram extraídos com solução de acetato de cálcio ($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Ca} \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0,05 M) e determinados por complexiometria. O hidrogênio, acidez não trocável (H^+), foi determinado pela diferença algébrica entre a acidez potencial e a acidez trocável.

Os valores da soma de bases (S), da capacidade de troca de cátions (T) e da porcentagem de saturação em bases (V) foram calculados com base nos dados químicos obtidos.

A condutividade elétrica foi realizada pelo método do extrato de saturação, através da preparação da pasta saturada com água e determinada por condutimetria.

O equivalente de carbonato de cálcio foi determinado através do ataque da amostra de solo com excesso de solução padrão de HCL 0,5N e posterior titulação do excesso de ácido com a solução de NaOH 0,25N.

Para determinação do carbono orgânico total, utilizou-se a metodologia proposta por (YEOMANS; BREMNER, 1988) e adaptada por (MENDONÇA; MATOS, 2005), onde a oxidação da matéria orgânica se processou em via úmida.

Os óxidos de ferro pedogênico (Fed), foram extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato e para extração óxidos de ferro de baixa cristalinidade (Feo), foi utilizado o oxalato ácido de amônio (IAC, 1986). As leituras para determinação das diferentes formas de ferro foram realizadas em espectrofotômetro de absorção atômica.

2.2.3.2 Análises físicas

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, que se baseia na velocidade de deposição das partículas que compõem o solo, conforme a Lei de Stokes, utilizando-se como dispersante químico o hexametáfosfato de sódio (EMBRAPA, 1997).

A argila dispersa em água seguiu o mesmo procedimento do método da pipeta só que sem o uso de dispersante químico.

O grau de floculação foi calculado por meio da relação entre a argila dispersa em água e a argila total obtida pela análise granulométrica.

A densidade das partículas foi determinada seguindo a metodologia do balão volumétrico, que consiste na determinação do volume de álcool etílico gasto para completar a capacidade de um balão de 50 mL, contendo 20 g de solo seco em estufa (EMBRAPA, 1997).

2.2.3.3 Análise mineralógica

Para a obtenção dos difratogramas de raios-X dos filossilicatos as amostras receberam um tratamento prévio para remoção da matéria orgânica com peróxido de hidrogênio (H_2O_2 30%) e dos óxidos de ferro com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB). Posteriormente amostras de argila foram saturadas com K^+ (KCl) e Mg^{2+} (MgCl). As amostras de argila saturadas com K^+ receberam tratamento térmico (25 °C e 550 °C) enquanto as saturadas com Mg^{2+} foram glicoladas (MHERA; JACKSON, 1960). Foram feitos também os difratogramas da fração argila natural (sem tratamento).

Os difratogramas foram obtidos em amostras orientadas em um Difratoômetro, (Skimadzu XRD 6000) com tubo de cobre, em uma voltagem de 40kv, corrente de 20 mA, fenda de 10 deg com velocidade de 1,5 (deg/min). A identificação dos minerais presentes foi realizada com base nos espaçamentos basais de cada mineral, expressos nos difratogramas, conforme Jackson (1969).

2.2.3.4 Análise micromorfológica

Para efetuar a análise micromorfológica, foram coletadas amostras com estrutura indeformada dos horizontes Ac, Bic1 e Bic2 da área não irrigada e Apc, Bic1 e Bic2 da área irrigada. As amostras foram secas ao ar e depois em estufa de circulação forçada a 35 °C. Antes de se iniciar o processo de impregnação com resina realizou-se a substituição da água por acetona. Posteriormente as amostras foram impregnadas com uma mistura de resina de poliéster e estireno. Após a secagem à temperatura ambiente as amostras foram seccionadas, polidas e coladas em lâminas de vidro e, novamente, seccionadas e polidas até espessura ideal para realização das análises micromorfológicas (30 μ m). As seções delgadas foram analisadas em microscópio petrográfico e as descrições feitas conforme critérios e terminologia propostos por Bullock et al. (1985).

As fotomicrografias foram obtidas por meio de uma câmara fotográfica, acoplada ao microscópio petrográfico, dotada de controle automático de exposição.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Atributos morfológicos

As descrições morfológicas dos perfis de solo realizadas no campo (Anexo I) encontram-se resumidas na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos morfológicos dos horizontes dos perfis dos solos da área não irrigada (NIR) e sob irrigação (IR).

Horiz.	Prof.(cm)	Cor	Consistência		Estrutura
			Mussel	seca	
CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico (NIR)					
Ac	0-17	7,5YR 3/4	Lig.duro	Mui. friável	Mod pq md Bl suba
Bic1	17-31	7,5YR 3/3	Macio	Mui. friável	Mod mpq md Bl suba
Bic2	31-44	7,5YR 3/3	Lig.duro	Mui. friável	Mod pq gde Bl suba
Bic3	44-48	7,5YR 3/4	-	Mui. friável	Mod pq md Bl suba
Ccrk	48-82	-	-	-	-
Ccrk/R	82-119	2,5Y 7/4	-	friável	-
Crkc1	119-141	2,5Y 7/4	-	friável	-
Crkc2	141-177+	2,5Y 8/1	-	-	-
CHERNOSSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico (IR)					
Apc	0-18	7,5YR 3/3	Lig.duro	Friável	Ft md gran Bl sub
Bic1	18-33	7,5 YR 3/4	Lig.duro	Mui. friável	Mod md Bl suba
Bic2	33-55	7,5 YR 3/4	Lig.duro	Mui. friável	Mod gde md Bl suba
Ccrk1	55-132	-	-	-	-
Ccrk2	132-174+	2,5 Y 6/4	-	-	-

Cor úmida; Bl= Blocos; suba= subangulares; gran= granular; mpq= muito pequeno; pq= pequeno; md= médio; gde= grande; mod= moderada; ft= forte.

De acordo com as descrições morfológicas do solum, pode-se observar que não houve diferenças marcantes na cor dos perfis estudados, sendo a mesma classificada como bruno-escuro, correspondente ao matiz 7,5YR, com valores de 3 e cromas de 3 e 4. Observa-se ainda que os parâmetros valor e croma se apresentam baixos, devido ao

elevado conteúdo de matéria orgânica nesses solos, conteúdo este relacionado à presença de gramíneas que resulta no aumento da biomassa vegetal.

Nesses solos a predominância de cores amareladas contrasta com as cores geralmente encontradas em ambientes semelhantes, onde se tem boa drenagem e o clima se encontra mais seco, o que favorece a presença de cores avermelhadas devido à presença de hematita. Assim a presença de cores amareladas deve estar associada a condições de umidade mais favoráveis a presença da goethita. Estudos relatam que a hematita e goethita podem coexistir em função do ciclo de umedecimento e secagem (BOERO; SCHWERTMANN, 1989).

De modo geral os solos apresentaram-se profundos (EMBRAPA, 2006), sendo observado que no perfil 2 irrigado (IR) a espessura do solum é maior do que do perfil 1 não irrigado (NIR), com aproximadamente 8 cm de diferença. Com base nesse atributo pode-se dizer que os dois solos possuem evolução diferente, ou seja, o solo do perfil 2 (IR) encontra-se mais evoluído do que do perfil 1 (NIR), visto que para a formação de 1 cm de solo são necessários aproximadamente 100 anos.

Com relação à estrutura, verificou-se que os dois perfis apresentaram nos seus horizontes estruturas do tipo blocos subangulares. A consistência não apresentou diferenciação entre as duas áreas variando de ligeiramente duro quando seco, para muito friável quando úmido e muito plástico e pegajoso quando molhado. Estas características estão relacionadas à presença de altos teores argilominerais nesses solos, ou seja, esses solos são providos de argila com alta capacidade de troca catiônica (argila de atividade alta).

No campo foi observada diferença perceptível na morfologia entre os perfis avaliados, com a presença de superfícies alisadas com brilho, que a princípio no campo foi denominada como cerosidade apenas nos horizontes de subsuperfície do perfil 2 (IR) (Anexo I). Com a análise micromorfológica, que será vista posteriormente, foi possível identificar a ocorrência de superfícies de compressão e não de cerosidade, visto que a cerosidade mostra-se micromorfológicamente como argilãs de iluviação, caso não identificado nesse solo.

2.3.2 Atributos físicos e químicos

O resultado da análise granulométrica (Tabela 2) evidencia que a variação de umidade entre os perfis, causou algumas mudanças nas quantidades de algumas frações,

entretanto não suficientes para que ocorressem alterações nas classes texturais. Verifica-se que ocorreu predomínio da classe textural franco-argilosa nos horizontes dos dois perfis.

No que diz respeito à relação silte/argila (Tabela 2), utilizada para auxiliar na mensuração do grau de intemperismo dos solos (ANJOS *et al.* 1998), os resultados evidenciam assim, o pouco desenvolvimento pedogenético dos solos em questão. De acordo com EMBRAPA (2006) solos de textura média com valores menores que 0,7 e com textura argilosa com valores menores que 0,6 são considerados de alto grau de intemperismo. Desta forma verificam-se valores maiores da relação silte/argila do que os mencionados pelo sistema de classificação.

Apesar de altos valores dessa relação observam-se menores valores na área irrigada quando comparados com os dos solos da área não irrigada. Este acontecimento sugere um maior grau de alteração dos solos na área irrigada, corroborando os dados de espessura do solum e os resultados de argila e silte (Figura 3 e 4).

Sobre os teores de argila observa-se que na área irrigada (perfil 2) o teor desta fração no solum é maior quando comparado ao de silte (Figura 4). Pode-se dizer que a irrigação esta afetando o teor de argila nesse perfil, este fato não indica translocação de argila nesse solo, pois o mesmo possui uma distribuição regular desta fração nesse perfil. Estudos feitos em solos irrigados contrastando com não irrigados no Kansas, mostraram resultados diferentes do presente estudo, pois foi verificado translocação de argila no solo irrigado, ou seja, aumento do teor de argila com formação de horizonte Bt (PRESLEY *et al.* 2004). O fato de não ter ocorrido movimento de argila e consequente translocação de argila no solo irrigado, pode estar associado à presença de elevados teores de cálcio nessa área, no qual age como agente floculante das partículas de argila (SIX *et al.* 2004).

Figura 3: Valores médios da relação silte/argila no horizonte Bi dos perfis localizados na área não irrigada (NIR) e área irrigada (IR).

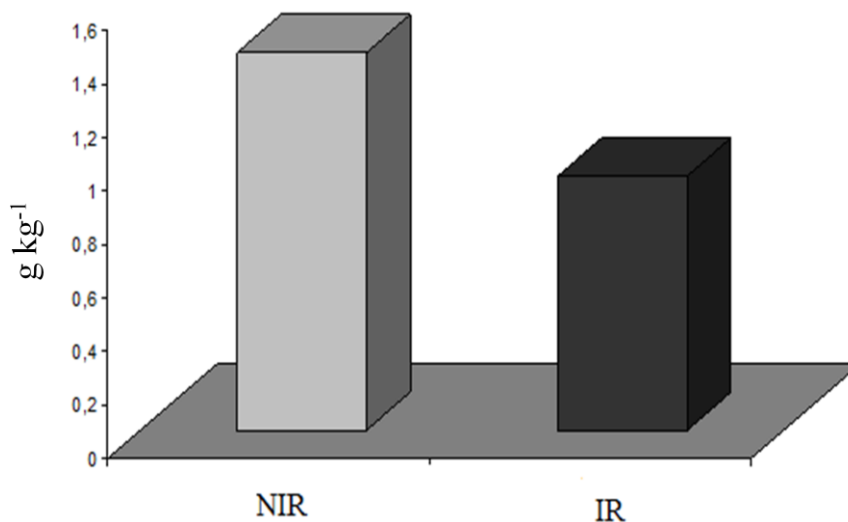
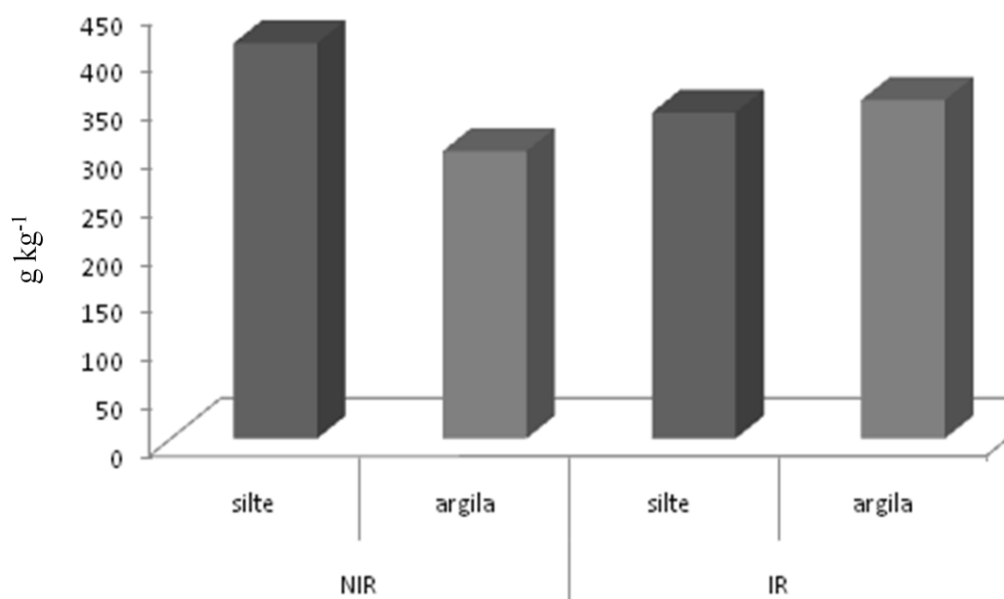


Figura 4: Valores médios dos teores de silte e argila do solum dos dois perfis estudados. NIR (área não irrigada) e IR (área irrigada).



A argila dispersa em água (ADA) nos horizontes do perfil não irrigado variou de 118 a 209 g. kg⁻¹ e no perfil irrigado ficou entre 162 a 254 g. kg⁻¹, observando-se então que ocorreu um aumento da ADA no perfil irrigado e conseqüentemente a ocorrência de menores valores do grau de floculação em relação ao perfil sob vegetação natural. Esse aumento da ADA na área irrigada pode estar relacionado ao efeito do Na⁺, encontrado em maior quantidade nessa área (Tabela 3). Em relação à densidade de partículas não se verificou diferença nos valores entre os dois perfis avaliados.

O íon sódio, devido ao seu maior raio iônico quando hidratado, aumenta a espessura da dupla camada difusa, que segundo Spera *et al.* (2008), é o fator determinante para a ocorrência de dispersão da fração argila. Cátions com alto grau de hidratação formam complexos de esfera externa e aumentam a distância entre as partículas, causando a dispersão das mesmas (MEURER, 2006).

Quanto à atividade da fração argila (AA) (Tabela 3) observando-se os horizontes B dos perfis, os resultados evidenciam que ambos os solos apresentam atividade de argila maior de 27 cmolc kg⁻¹, sendo assim classificados como solos Ta (argila de atividade alta) (EMBRAPA, 2006). Quanto aos atributos químicos (Tabela 3) verifica-se elevados valores de pH, capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB) e saturação por bases (V%), nos dois solos analisados. Observam-se ainda baixos valores de acidez potencial e ausência de alumínio no complexo de troca. Todos estes resultados são coerentes com o material de origem calcário e o ambiente semiárido.

Os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ são os responsáveis pelo alto teor de soma de base nos dois perfis. Isto está relacionado à influência do material de origem (Calcário Jandaíra) desses solos, segundo Ernesto Sobrinho, (1980).

Em relação ao pH pode-se dizer que a reação dos dois solos varia de moderadamente alcalina a fortemente alcalina (pH= 7,4 - 8,3) e (pH > 8,3), respectivamente, de acordo com Embrapa, (2006). Os dois solos apresentam ΔpH negativo, o que indica o predomínio de cargas negativas na superfície dos colóides, e corrobora os valores de AA.

Com relação ao potássio nota-se que sua concentração foi maior no perfil 2 (IR), isso de acordo com Lemos *et al.* (1997) deve estar associado à intemperização de mica-ilita presente no material de origem desse solo. Moreira (2012), estudando resíduo do material calcário de solos da Chapada do Apodi, identificou nos difratogramas de raios - X a presença de mica – ilita.

Em relação ao fósforo (P), foram encontrados baixos teores desse elemento nos dois solos. Este acontecimento é comum em solos derivados de rochas calcárias. Apesar dos baixos valores observa-se que na área irrigada, onde se realizara adubação fosfatada, ocorrem maiores concentrações de P. Nesses pedoambientes calcários, com pH elevado e altas concentrações de Ca^{2+} trocável e carbonatos, é muito provável a ocorrência de precipitação de P na forma de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ e, ou, sua adsorção ao CaCO_3 (COLE *et al.* 1953; SOLIS; TORRENT, 1989; WANG;TZOU, 1995; NOVAIS; SMYTH, 1999).

Os teores de carbono orgânico apresentam decréscimo em profundidade, fato este já esperado, pois o maior aporte de matéria orgânica ocorre na parte superficial do solo.

Tabela 02 – Dados físicos para fins de caracterização dos perfis não irrigado (NIR) e irrigado (IR).

Horiz.	prof. cm	Composição granulométrica			S/A	ADA	Grau de flocculação %	Dens.partic. (g/cm ³)	Textura
		areia	silte	argila					
-----g kg ⁻¹ -----									
CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico (NIR)									
Ac	0-17	283,0	465,8	251,2	1,85	179,2	28,66	2,33	Franco argilosa
Bic1	17-31	242,0	530,0	228,0	2,32	209,2	8,25	2,77	Franco argilosa
Bic2	31-44	302,0	394,4	303,6	1,30	118,4	61,00	2,87	Franco argilosa
Bic3	44-48	325,0	258,8	416,2	0,62	159,2	61,75	2,52	Argila
Ccrk	48-82	300,5	450,1	249,4	1,80			2,14	Franco
Ccrk/R	82-119	287,0	553,0	160,0	3,46			2,49	Franco siltosa
Crkc1	119-141	214,0	662,2	123,8	5,35			2,73	Franco siltosa
Crkc2	141-177+	145,0	734,0	121,0	6,07			2,66	Franco siltosa
CHERNOSSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico (IR)									
Apc	0-18	327,3	335,8	336,9	1,00	162,0	48,21	2,43	Franco argilosa
Bic1	18-33	304,5	325,7	369,8	0,88	253,6	25,5	2,63	Franco argilosa
Bic2	33-55	289,0	359,0	352,0	1,02	254,8		2,50	Franco argilosa
Ccrk1	55-132	261,5	424,7	313,8	1,35			2,53	Franco argilosa
Ccrk2	132-174+	305,0	503,8	191,2	2,63			2,66	Franco

Legenda: Hor: Horizonte; prof : profundidade; S/A: relação silte/argila; ADA: argila dispersa em água.

Tabela 03 – Dados químicos para fins de caracterização dos perfis não irrigado (NIR) e irrigado (IR).

Horizonte	prof. cm	pH		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)								V %	m	CO (g kg ⁻¹)	CE (dS m ⁻¹)	Sat. c/ sódio (100 Na+/T)	P (mg kg ⁻¹)	Eq. CaCO ₃ (g kg ⁻¹)	AA (g kg ⁻¹)
		H ₂ O	KCl	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H ⁺	S	T								
CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico (NIR)																			
Ac	0-17	8,00	7,46	9,50	3,70	0,90	0,48	0,00	0,20	14,58	14,78	98,65	0	10,97	0,27	3,25	0,03	212,50	
Bic1	17-31	8,21	7,60	8,50	4,30	0,35	0,53	0,00	0,20	13,68	13,88	98,56	0	9,88	0,23	3,80	0,04	208,75	60,88
Bic2	31-44	8,40	7,73	9,70	6,10	0,10	1,03	0,00	0,00	16,93	16,93	100,00	0	9,40	0,36	6,09	0,04	210,75	55,76
Bic3	44-48	8,18	7,70	9,50	5,50	0,10	1,06	0,00	0,10	16,15	16,25	99,38	0	9,26	0,50	6,50	0,03	218,25	39,04
Ccrk	48-82	8,26	7,96	5,00	7,00	0,09	1,99	0,00	0,00	14,08	14,08	100,00	0	4,87	0,44	14,15	0,03	241,00	
Ccrk/R	82-119	9,00	8,29	4,70	3,60	0,09	2,35	0,00	0,00	10,74	10,74	100,00	0	3,29	0,42	21,90	0,02	241,25	
Crkc1	119-141	9,23	8,46	5,30	2,10	0,10	2,16	0,00	0,20	9,66	9,86	97,97	0	2,74	0,30	21,92	0,04	240,00	
Crkc2	141-177+	9,25	8,52	2,50	5,50	0,09	2,09	0,00	0,10	10,18	10,28	99,03	0	13,92	0,23	20,32	0,03	242,00	
CHERNOSSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico (IR)																			
Apc	0-18	8,14	7,56	10,00	4,00	0,93	1,54	0,00	0,20	16,47	16,67	98,80	0	12,34	0,27	9,22	0,75	145,00	
Bic1	18-33	8,25	7,56	11,20	3,80	1,35	1,32	0,00	0,10	17,67	17,77	99,44	0	10,97	0,26	7,43	0,24	230,00	48,05
Bic2	33-55	8,22	7,24	12,70	4,40	0,47	1,46	0,00	0,40	19,03	19,43	97,94	0	7,27	0,13	7,54	0,05	157,50	55,20
Ccrk1	55-132	8,58	7,64	8,50	5,50	0,33	1,42	0,00	0,20	15,75	15,95	98,75	0	4,05	0,27	8,88	0,03	242,50	
Ccrk2	132-174+	8,91	7,92	5,20	2,80	0,36	1,32	0,00	0,20	9,68	9,88	97,98	0	2,06	0,30	13,36	0,03	241,25	

Legenda: prof: profundidade; S: soma de base; T: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; C: carbono orgânico; CE: condutividade elétrica; P: fósforo assimilável; AA: atividade de argila.

A composição química dos cátions e dos ânions do extrato de saturação dos solos analisados encontra-se na Tabela 4. É provável que em solos irrigados as características observadas no extrato de saturação do solo reflitam de forma mais confiável o que se observa em campo, pois o solo permanece com a umidade próxima à capacidade de campo (NUNES *et al.* 2008).

Observa-se que o Ca^{2+} é o cátion que domina entre os demais nos dois perfis. As concentrações de CO_3^{2-} encontradas foram mais elevadas na área irrigada. Já as de HCO_3^- e Ca^{2+} foram maiores na não irrigada, confirmando o maior conteúdo de CaCO_3 nessa área. Em relação ao Na^+ encontrado no extrato de saturação verifica-se maiores valores na área irrigada, provavelmente sendo adicionado via água de irrigação.

Em relação ao conteúdo de CaCO_3 , observa-se que no perfil 2 da área irrigada ocorre diminuição do mesmo quando comparado com a área não irrigada, perfil 1. Esta diminuição deve estar relacionada a uma maior intensidade dos processos de dissolução de carbonato de cálcio no solo desse perfil devido a maior disponibilidade de água pela irrigação neste local.

Tabela 4. Valores dos ânions carbonato e bicarbonato e Ca^{2+} e Na^+ solúveis no extrato de saturação do solo, em área não irrigada (NIR) e área irrigada (IR).

Horizontes		Íons solúveis (cmol _c /l)			
Símbolo	Prof. (cm)	Ca^{2+}	Na^+	CO_3^{2-}	HCO_3^-
CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico (NIR)					
Ac	0-17	1,60	0,08	0,05	1,05
Bic1	17-31	1,55	0,07	0,03	0,80
Bic2	31-44	2,00	0,09	0,03	0,90
Bic3	44-48	3,84	0,11	0,03	1,20
Ccrk	48-82	1,72	2,08	0,03	1,10
Ccrk/R	82-119	4,08	3,17	0,10	1,20
Crkc1	119-141	2,20	2,82	0,13	0,75
Crkc2	141-177+	1,81	3,50	0,13	0,70
CHERNOSSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico (IR)					
Apc	0-18	1,49	0,15	0,08	0,75
Bic1	18-33	1,70	0,21	0,23	1,15
Bic2	33-55	0,52	0,16	0,10	0,85
Ccrk1	55-132	0,54	0,18	0,08	0,75
Ccrk2	132-174+	0,72	0,26	0,13	1,10

Os teores de ferro cristalino (Fed) e ferro amorfo (Feo) são apresentados na Tabela 5. Observa-se que os teores de ferro cristalino variaram de 4,96 a 58,07 g kg⁻¹ no

perfil não irrigado e de 6,08 à 66,08 g kg⁻¹ na área irrigada, e o ferro amorfo, em menor quantidade, variou de 0,01 à 1,66 g kg⁻¹ e 0,34 à 1,78 g kg⁻¹ nas respectivas áreas.

Verifica-se que os maiores teores de ferro amorfo ocorrem nos horizontes superficiais, isto está associado ao maior aporte de matéria orgânica nesses horizontes, favorecendo a formação de ferro de menor cristalinidade. Segundo Schwertmann (1996) a matéria orgânica age como complexante inibindo a cristalização dos óxidos de ferro. Isto favorece a ocorrência de maiores quantidade de ferro de baixa cristalinidade.

Quanto aos teores de ferro cristalino, observa-se que os teores tendem a diminuir em profundidade. O mesmo comportamento foi observado por Muggler *et al.* (1996), estudando solos derivados de calcário no sudoeste da Bahia. Uma provável explicação para a diminuição dos teores de Fed em profundidade em alguns perfis, é sua associação com o CaCO₃ (BLUME; SCHWERTMANN; 1969).

Em relação à razão Feo/Fed, verifica-se que os valores encontrados no perfil da área não irrigada (0,00 a 0,04) e no perfil da área irrigada (0,01 a 0,06) estão de acordo com a afirmação de Sakurai *et al.* (1989) de que o elevado intemperismo em ambientes tropicais promove cristalização dos óxidos de ferro, resultando em baixas relações entre as formas amorfas e cristalinas, que variam de 0,03 a 0,3 para solos caulíníticos do Japão. Os baixos valores dessa relação indicam também o predomínio de formas de ferro (hematita e goethita) de maior grau de cristalinidade (OLIVEIRA *et al.* 1998).

Observando os valores de Fed do solum nos dois perfis, verifica-se que o mesmo encontra-se mais elevado no perfil 2 (IR), indicando maior presença de óxidos cristalinos nesse solo e portanto evidenciando maior evolução do mesmo em comparação ao solo do perfil 1 (NIR).

Tabela 5: Ferro de menor cristalinidade (Feo) e cristalino (Fed) nos diferentes perfis de solos.

Horizonte	Prof. cm	Fed	Feo	Feo/Fed
		g kg ⁻¹		
CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico (NIR)				
Ac	0-17	38,93	1,39	0,04
Bic1	17-31	58,07	1,66	0,03
Bic2	31-44	45,61	0,54	0,01
Bic3	44-48	41,59	0,83	0,02
Ccrk	48-82	13,61	0,42	0,03
Ccrk/R	82-119	8,94	0,25	0,03
Crkc1	119-141	5,88	0,27	0,05
Crkc2	141-177+	4,96	0,01	0,00
CHERNOSSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico (IR)				
Apc	0-18	66,08	0,97	0,01
Bic1	18-33	55,54	1,78	0,03
Bic2	33-55	60,85	0,99	0,02
Ccrk1	55-132	23,00	0,38	0,02
Ccrk2	132-174+	6,08	0,34	0,06

2.3.3 Classificação dos perfis

A partir das descrições morfológicas e dos dados analíticos já mencionados, os solos foram classificados até o 4º nível categórico, segundo os critérios estabelecidos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). O perfil NIR foi classificado como Cambissolo Háplico Carbonático saprolítico, devido à ocorrência do caráter carbonático nesse perfil (Eq. $\text{CaCO}_3 \geq 150\text{g Kg}^{-1}$) e por apresentar o horizonte Cr dentro de 100 cm da superfície do solo e sem contato lítico dentro de 150 cm. Já o perfil IR, sob irrigação, foi classificado como Chernossolo Háplico Carbonático saprolítico, por apresentar horizonte A chernozênico, seguido de horizonte B incipiente e possui argila de atividade alta. A classificação do horizonte superficial da área irrigada em A chernozênico foi devido o mesmo apresentar as características necessárias para essa classificação, cor escura, alta saturação por base, estrutura bem desenvolvida com grau de desenvolvimento moderado a forte e espessura mínima de 18 cm, conforme EMBRAPA (2006).

2.3.4 Mineralogia da fração argila e silte

Os difratogramas de raios-X da fração argila (argila natural e desferrificada) e seus respectivos tratamentos encontram-se nas figuras 5 a 12. Nos DRX referente à argila natural (Figura 5 e 6) observa-se que os perfis são semelhantes em relação à mineralogia, sendo esses solos compostos principalmente por mica, caulinita, goethita, anatásio, feldspato e argilominerais 2:1 interestratificados. Outros autores estudando solos derivados de calcário também identificaram esses minerais em seus estudos (BAUTISTA *et al.* 2011; MOTA *et al.* 2007; OLIVEIRA *et al.* 1998; MUGLLER *et al.* 1996; BELLANCA *et al.* 1996).

Figura 5 - DRX da fração argila natural do perfil 1 Cambissolo Háplico Carbonático saprolítico (NIR). Mc: mica; Ct: caulinita; Gt: goethita; An: anatásio; Fd: feldspato.

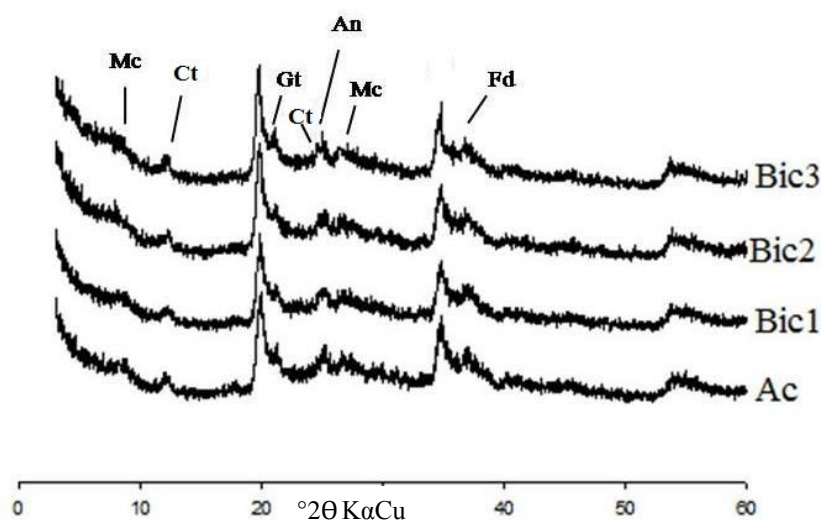
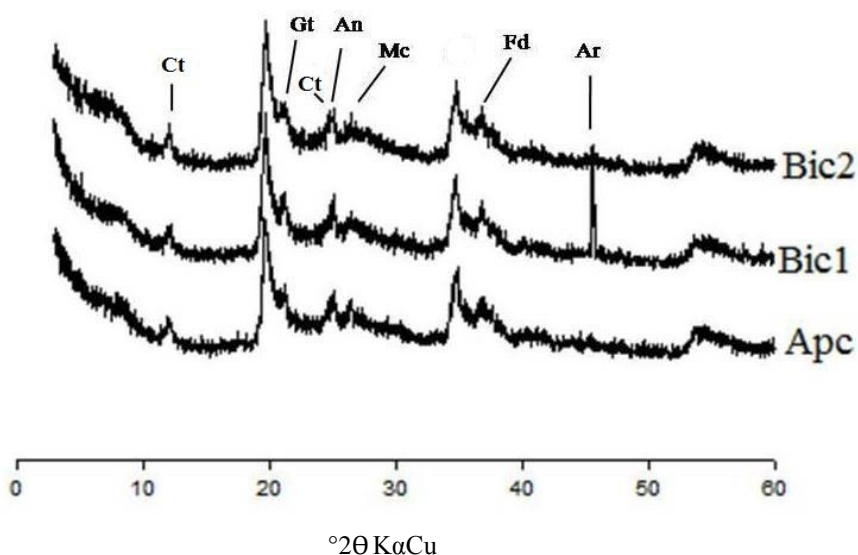


Figura 6- DRX da fração argila natural do perfil 2 Chernossolo Háplico Carbonático saprolítico (IR). Mc: mica; Ct: caulinita; Gt: goethita; An: anatásio; Fd: feldspato; Ar: aragonita



Verifica-se nos DRX 7 e 8 referentes aos horizontes Ac (NIR) e Apc (IR), que a fração argila é composta por caulinita e ilita. A caulinita está bem caracterizada pelo desaparecimento dos picos característicos da mesma quando a amostra saturada com K foi submetida ao tratamento térmico de 550°C, dentre os quais se destacam os de espaçamento (d) de 0,724, 0,357 nm. A ilita foi constatada pela permanência de picos a 550°C correspondentes aos picos, como por exemplo, os de 0,101 e 0,497 nm. De acordo com Bellanca *et al.* (1996) e Laveuf *et al.* (2009) a ocorrência de ilita e caulinita nos solos deve estar relacionada com a presença destes minerais no material de origem dos solos, o mesmo foi verificado por Moreira (2012).

Os DRX da fração argila dos horizontes subsuperficiais localizados na área não irrigada (Figura 9 e 11) mostram que a mineralogia desse solo é composta por caulinita, ilita, anatásio que foi identificado pelo pico característico de 0,352 nm e argilominerais 2:1 interestratificados. Nos DRX referentes aos horizontes subsuperficiais do solo irrigado (Figuras 10 e 12), verifica-se que a assembléia mineralógica é semelhante a do solo não irrigado. Em estudo de solos derivados de calcário na Grécia, os DRX mostram a presença dominante de caulinita e de minerais expansíveis. No entanto os mesmos enfatizam que em muitos outros casos esses minerais não são dominantes (YASSOGLU *et al.* 1997).

A presença de caulinita nesses solos parece estranha, pois se espera a formação bem mais intensa de argilominerais nos mesmo. Segundo Resende (1989) a presença de muscovita no resíduo do material de origem juntamente com a rocha calcária, maior solubilização da sílica, associada ao equilíbrio da relação entre as atividades dos íons K^+ e $Ca^{2+} + Mg^{2+}$, favorecem a rápida formação da caulinita nesses solos considerados jovens. Já Alencar (2002) atribui à formação da caulinita a condições climáticas pretéritas, em que os solos da Chapada do Apodi teriam sido formados sob clima quente com precipitações abundantes e que hoje passam por um intemperismo sob o clima semiárido.

Analisando ainda os DRX dos horizontes de subsuperfície do solo irrigado (Figura 10 e 12), observam-se picos mais intensos da caulinita quando comparados aos DRX dos horizontes Bic do solo que não recebe irrigação. Outra diferença observada é que nos DRX do solo irrigado os “ombros” referentes aos minerais 2:1 (mal formados) são mais nítidos e intensos do que os do solo não irrigado, isto pode ser observado claramente no DRX do horizonte Bic2 irrigado (Figura 12).

A gênese de argilominerais expansíveis no solo geralmente está associada a processos de transformação/alteração de minerais primários como muscovita e clorita (OWLIAIE, ABTAHI, HECK, 2006; ERNESTO SOBRINHO, 1980). Nos solos em questão uma provável explicação para a presença de minerais expansivos, seria a transformação/alteração de micas (ERNESTO SOBRINHO, 1980) originado minerais expansivos no solo.

A outra possível explicação para a ocorrência destes minerais expansíveis seria a neoformação dos mesmos nesta área devido à irrigação, uma vez que não se tem a ocorrência de minerais 2:1 nesses solos, como foi verificado por Moreira (2012). Jackson *et al.* (1952) indicaram que a alteração da mica pode levar à formação de illita, vermiculita, esmectita e de minerais tipo 2:1 interestratificados.

Segundo Buckman e Brady (1989) a mineralogia da fração silte é em geral, constituída por minerais mais resistentes ao intemperismo como o quartzo e outros minerais primários como os anfibólios, piroxênios, feldspatos e micas.

Os DRX da fração silte (Figura 13 e 14) mostram que a mineralogia dos dois perfis é muito semelhante e composta principalmente por quartzo, feldspato e carbonatos (calcita, dolomita e aragonita). Observa-se ainda a o desaparecimento de picos de carbonatos nos difratogramas referentes aos horizontes do solo irrigado, corroborando a hipótese de dissolução de carbonatos de cálcio nesse solo. Verifica-se também o desaparecimento de picos de feldspatos na área irrigada.

Figura 7 - DRX da fração argila desferrificada do perfil 1, horizonte Ac de um Cambissolo Háplico Carbonático saprolítico (NIR); K 25 - saturado com potássio à 25 °C; K 550 saturado com potássio e aquecido à 550 °C; Mg saturado com magnésio; MgGli – saturado com magnésio e solvatado com glicerol. Il: ilita; Ct: caulinita.

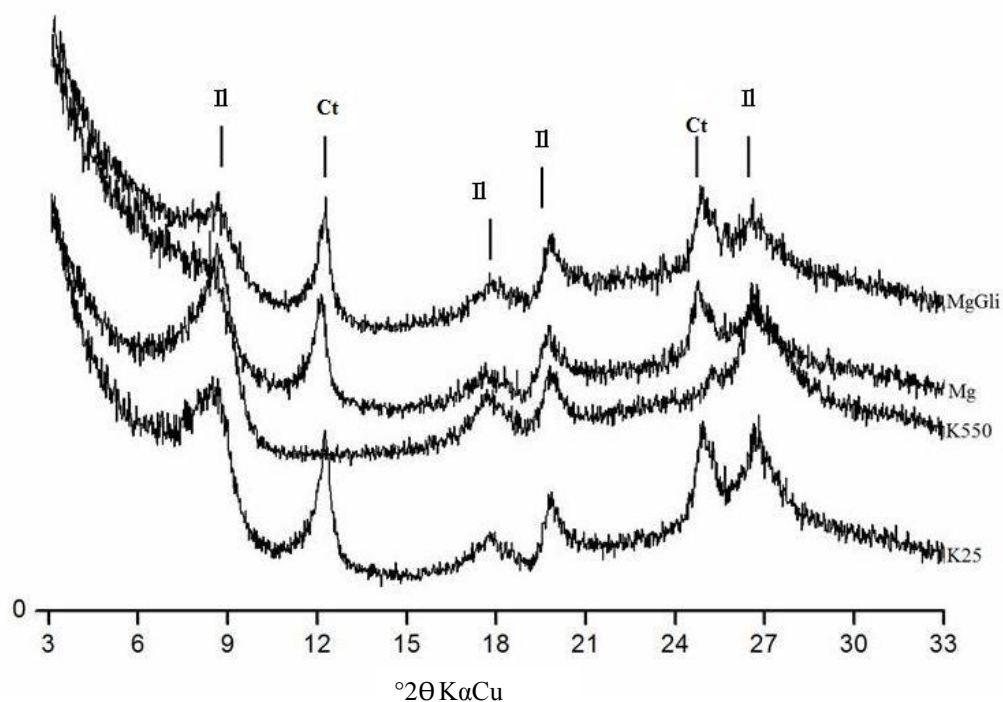


Figura 8 - DRX da fração argila desferrificada do perfil 2, horizonte Apc de um Chernossolo Háplico Carbonático saprolítico (irrigado); K 25 - saturado com potássio à 25 °C; K 550 saturado com potássio e aquecido à 550 °C; Mg saturado com magnésio; MgGli – saturado com magnésio e solvatado com glicerol. Il: ilita; Ct: caulinita.

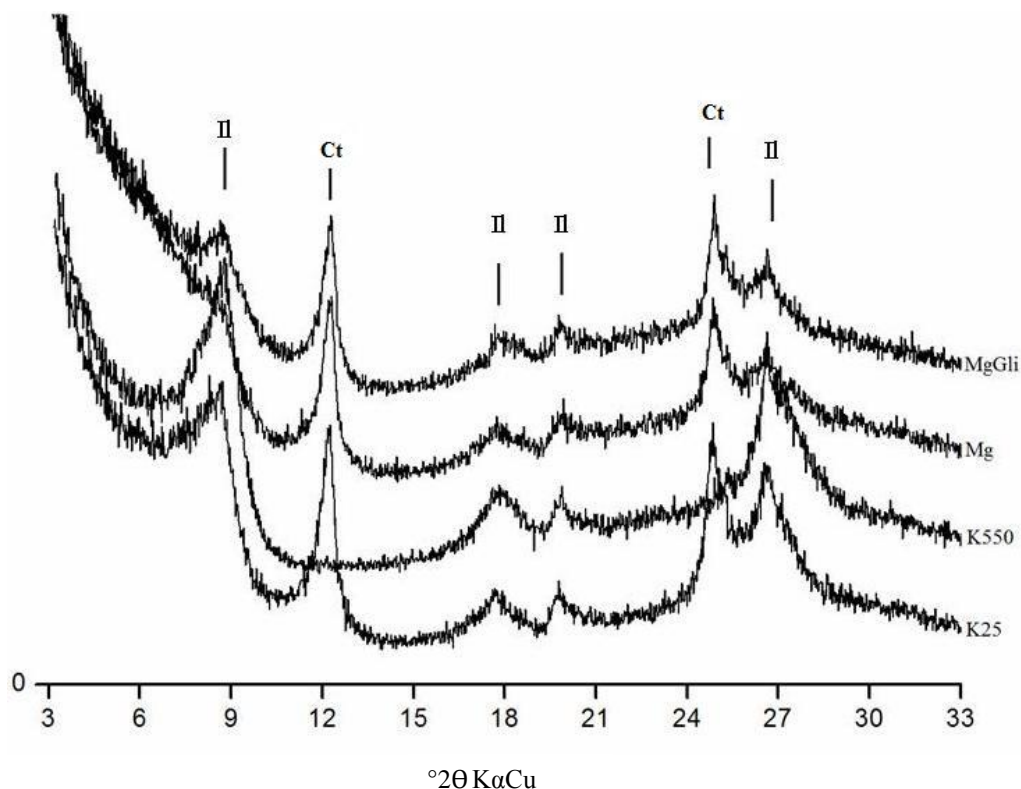


Figura 9 - DRX da fração argila desferrificada do perfil 1, horizonte Bic1 de um Cambissolo háplico carbonático saprolítico (NIR); K 25 - saturado com potássio à 25 °C; K 550 saturado com potássio e aquecido à 550 °C; Mg saturado com magnésio; MgGli – saturado com magnésio e solvatado com glicerol. II: ilita; Ct: caulinita; An: anatásio.

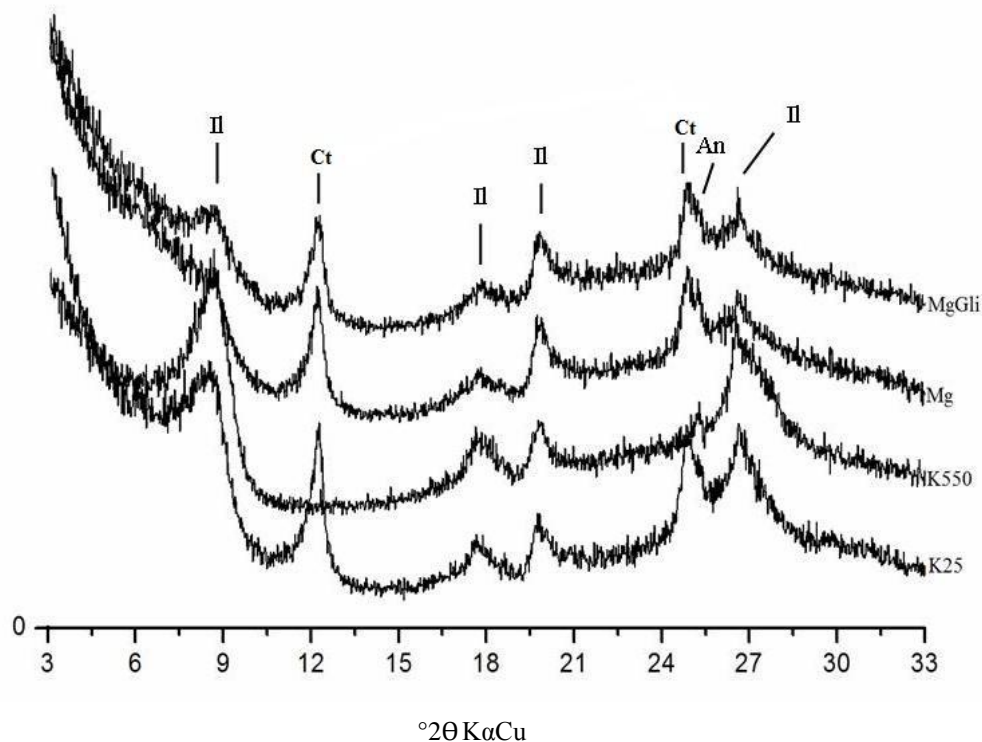


Figura 10 - DRX da fração argila desferrificada do perfil 2, horizonte Bic1 de um Chernossolo Háplico Carbonático saprolítico (irrigado); K 25 - saturado com potássio à 25 °C; K 550 saturado com potássio e aquecido à 550 °C; Mg saturado com magnésio; MgGli – saturado com magnésio e solvatado com glicerol. II: ilita; Ct: caulinita.

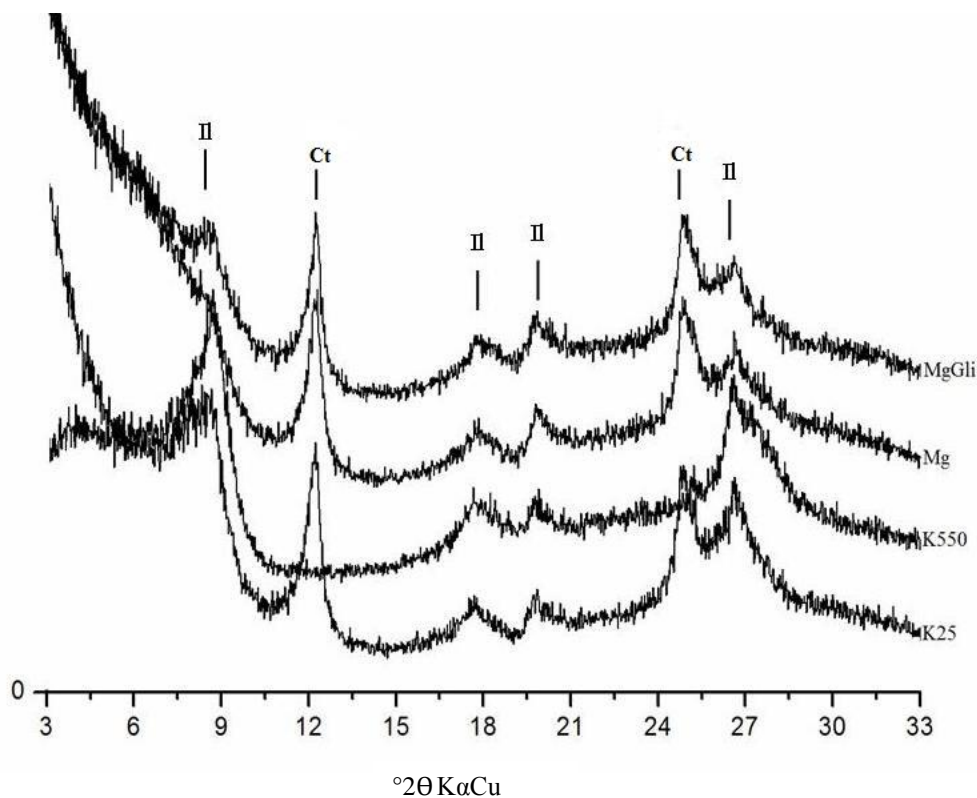


Figura 11 - DRX da fração argila desferrificada do perfil 1, horizonte Bic2 de um Cambissolo Háplico Carbonático saprolítico (NIR); K 25 - saturado com potássio à 25 °C; K 550 saturado com potássio e aquecido à 550 °C; Mg saturado com magnésio; MgGli – saturado com magnésio e solvatado com glicerol. Il: ilita; Ka: caulinita; An: anatásio.

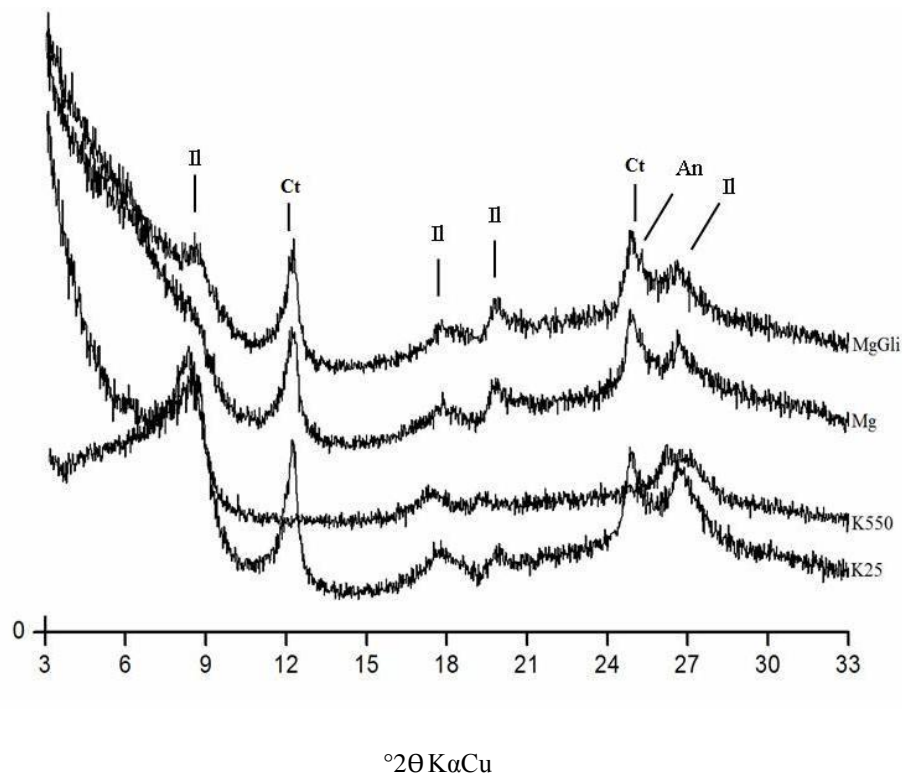


Figura 12 - DRX da fração argila desferrificada do perfil 2, horizonte Bic2 de um Chernossolo Háplico Carbonático saprolítico (irrigado); K 25 - saturado com potássio à 25 °C; K 550 saturado com potássio e aquecido à 550 °C; Mg saturado com magnésio; MgGli – saturado com magnésio e solvatado com glicerol. Il: ilita; Ka: caulinita; An: anatásio.

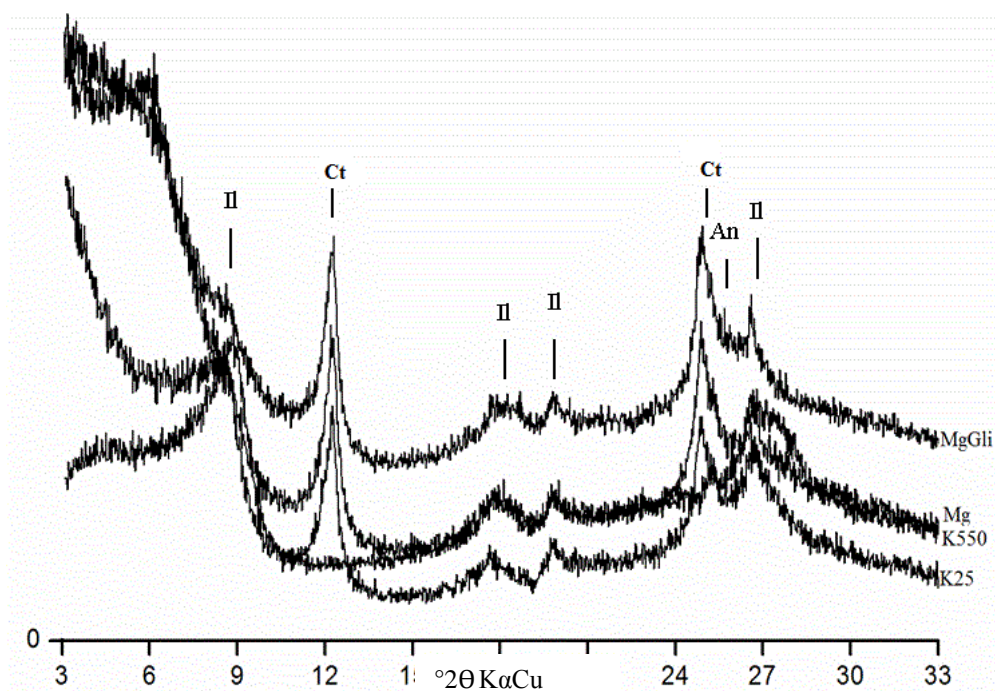


Figura 13 - DRX da fração silte do perfil 1 Cambissolo Háplico Carbonático saprolítico (NIR). Q: quartzo; Fd: feldspato; Ca: calcita; Ar; aragonita; Dl: dolomita.

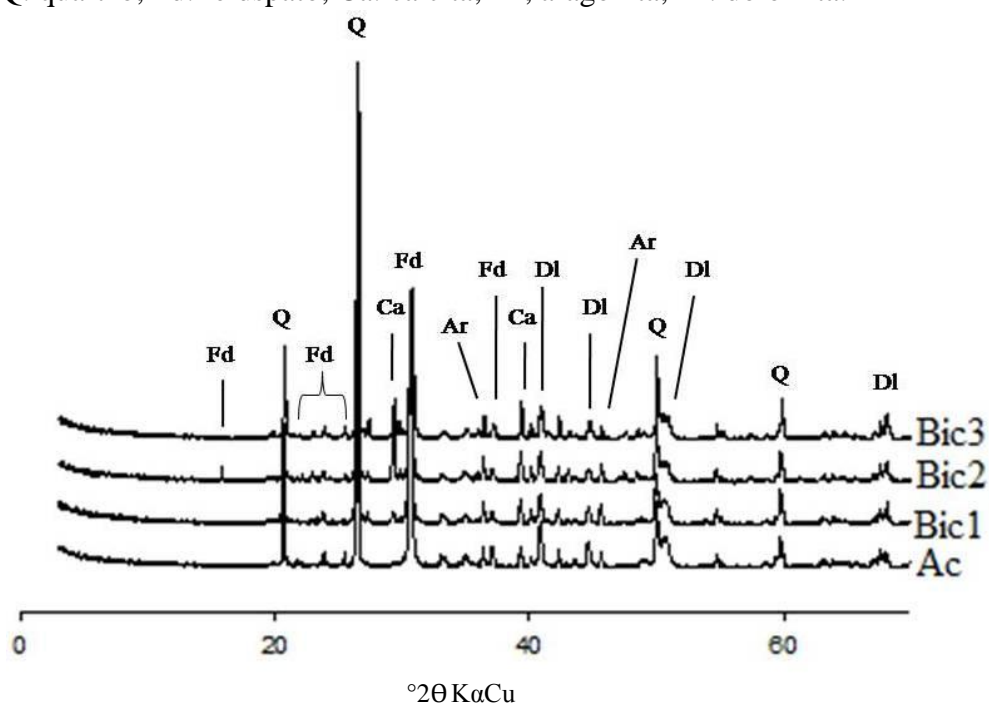
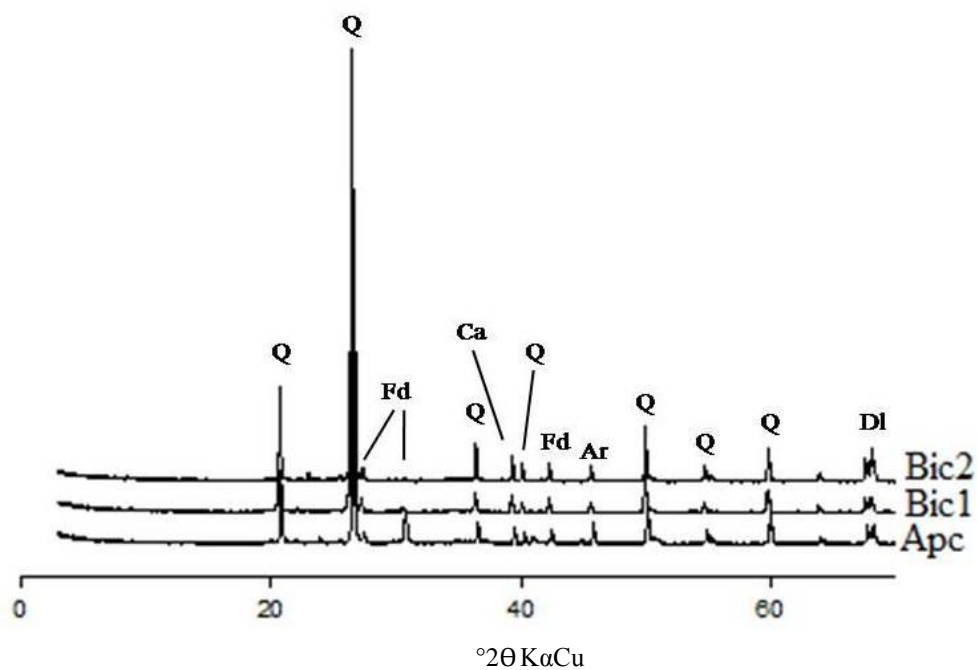


Figura 14 - DRX da fração silte perfil 2 Chernossolo Háplico Carbonático saprolítico (IR). Q: quartzo; Fd: feldspato; Ca: calcita; Ar; aragonita; Dl: dolomita.



12.3.5 Micromorfologia

Na Tabela 6 encontra-se um resumo das descrições micromorfológicas referentes aos horizontes dos solos analisados. De início observa-se que a distribuição relativa foi à mesma nos dois perfis, sendo classificada como porfírica (Figura 15). Entretanto nota-se uma diferença entre os perfis na relação G/F, onde a fração grosseira diminui no perfil irrigado. A diminuição deste material está de acordo com o observado para as frações argila e silte neste solo.

A similaridade entre os materiais constitutivos dos dois perfis, a composição e a distribuição das frações grosseiras e a organização destas frações, em relação às frações finas indica uma uniformidade entre os materiais constitutivos (material de origem) dos dois perfis.

Em relação à microestrutura (Figura 16 e 17), observou-se que no perfil 1 (NIR) ocorrem dois tipos: microestrutura em blocos subangulares e a ocorrência de grânulos. Já no perfil 2 (NIR) a microestrutura é basicamente composta por blocos subangulares. Em relação ao grau de pedalidade no perfil 1 (IR) o mesmo foi classificado como fracamente a moderadamente desenvolvido. O grau de pedalidade fortemente desenvolvido e a acomodação dos pedos na área irrigada mostram que a mesma possui uma pedogenese mais atuante (PAISANI; HENDGES, 2010) em relação à área não irrigada (Tabela 6).

A análise micromorfológica mostra que, de modo geral, há predomínio de poros do tipo cavidades e fissuras (Tabela 6) em ambos os solos. Observou-se ainda no exame das lâminas delgadas um predomínio de poros (microporos) na área irrigada. Estas observações estão de acordo com os atributos físicos analisados no capítulo 3 e com o maior grau de pedalidade observado nos horizontes dessa área (BULLOCK *et. al.* 1985).

Em relação ao material fino, o plasma e sua fábrica, observa-se que no perfil 1 (NIR) (Figura 18) que o solo apresenta b-fabric (fábrica birrefringente) do tipo salpicado de orientação manchada, onde se observa pontuações de argila. Já no solo do perfil 2 (IR) ocorreu a maior birrefringência, sendo a mesma do tipo estriada (Figura 19), com presença de estrias nas paredes dos poros (poroestriada), em volta do material grosseiro (granoestriada), estrias no meio do material fino (monoestriada) e estrias paralelas (paralelo estriada). Essa presença de estrias se dá devido aos ciclos de umedecimento e secagem e devido à ação mais intensa dos processos de expansão e

contração do solo nesse perfil, ocasionados pela irrigação. Essas características não podem ser consideradas como pedofeições de iluviação porque elas foram formadas por modificação *in-situ* de micromassas devido ao movimento da massa do solo (GUNAL; RANSOM, 2006). Estes resultados corroboram com a ocorrência de superfícies brilhosas (superfícies de compressão) no solo irrigado, já mencionado na macromorfologia.

Presley *et al.* (2004) em um estudo micromorfológico contrastando áreas irrigadas e não irrigadas, também evidenciaram a maior ocorrência destas b-fabric de tipo estriada nos solos irrigados, devido serem mais sujeitos aos estresses promovidos pelos processos de expansão e contração.

A presença de minerais expansivos em quantidades maiores, conforme constatada pela análise mineralógica, associada a ciclos alternados de umedecimento e secagem pode, segundo Oliveira *et.al.* (2004), ter produzido perturbações na massa do solo que possivelmente destruíram parte dos argilãs de iluviação e de intemperização *in situ*, dificultando, por vezes, sua correta identificação. Os mesmos autores observaram que a ocorrência de estrias no solo estudado parecia resultar da formação de argila “*in situ*” e do rearranjo da massa do solo, gerado pelos minerais expansivos quando submetidos à alternância de ciclos de umedecimento e secagem.

No que diz respeito às pedofeições, as mais observadas foram nódulos de ferro e manganês e nódulos de carbonato de cálcio (Figura 20 e 21). As feições de nódulos de ferro e manganês são também conhecidas como “chumbinhos de caça” (ERNESTO SOBRINHO, 1980) e são comumente observadas nos solos calcários da Chapada do Apodi-CE.

Nas duas áreas analisadas os nódulos de ferro destacaram-se da matriz do solo por apresentarem cores variando de marrom-avermelhado a preto. O tipo de nódulo de ferro encontrado foi típico, sendo os mesmos classificados como puros por apresentarem apenas um componente (BULLOCK *et. al.* 1985). Observou-se ainda que a quantidade de nódulos aumentava em profundidade nas duas áreas. Segundo Bullock *et al.* (1985), pedofeições de nódulos que apresentam cor preta podem ser constituídas de óxidos e hidróxidos de manganês. Ainda segundo o mesmo autor, as outras formas podem ser compostas por hematita e goethita, podendo a última ser mascarada pela ação da primeira.

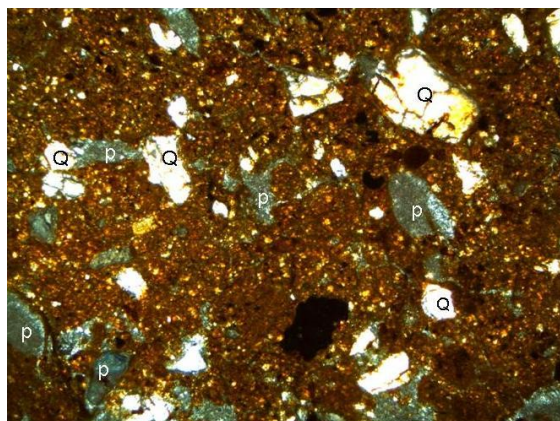
Tabela 6 – Principais características micromorfológicas dos perfis estudados

H/P (cm)	Descrição Geral	DR	Microestrutura	Poros	Pedofeições
Perfil 1 - CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico (NIR)					
Ac 2 - 14	Material grosseiro ocupando 25% da seção, enquanto material fino e poros ocupam 50 e 25% da seção respectivamente. Relação G/F - 2,5/5.	Porfírica aberta	Microestrutura de solo pedal composta por blocos subangulares, com grau de pedalidade fracamente e moderadamente desenvolvida, encontrando-se não acomodada a parcialmente acomodada.	Predomínio de cavidades com 70%. Fissuras e canais com 20% e 10% respectivamente.	Presença de nódulos de ferro típicos, nódulos de manganês e nódulos de carbonato de cálcio.
Bic1 18,5-30,5	Material grosseiro ocupando 20% da seção, enquanto material fino e poros ocupam 50 e 30% da seção respectivamente. Relação G/F - 2/5.	Porfírica aberta e fechada	Microestrutura de solo pedal composta por blocos subangulares e grânulos, com grau de pedalidade moderadamente desenvolvida, encontrando-se parcialmente acomodada.	Predomínio de cavidade com 40%. Composta por câmaras 20%, fissuras 20% e canais 20%.	Presença de nódulos de ferro típicos, nódulos de manganês e carbonato de cálcio na forma de nódulo e impregnado no fundo matricial.
Bic2 34 - 46	Material grosseiro ocupando 30% da seção, enquanto material fino e poros ocupam 40 e 30% da seção respectivamente. Relação G/F - 3/4.	Porfírica aberta e fechada	Microestrutura de solo pedal composta por blocos subangulares e grânulos, com grau de pedalidade moderadamente desenvolvida, não encontrando-se acomodada.	Predomínio de cavidade com 55%. Composta por câmaras 10%, fissuras 25% e canais 10%.	Presença de nódulos de ferro típicos, nódulos de manganês e carbonato de cálcio na forma de nódulo e impregnado no fundo matricial.
Perfil 2 - CHERNOSSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico (IR)					
Apc 3-15	Material grosseiro ocupando 20% da seção, enquanto material fino e poros ocupam 50 e 30% da seção respectivamente. Relação G/F - 2/5.	Porfírica aberta	Microestrutura de solo pedal composta por blocos subangulares, com grau de pedalidade fracamente e moderadamente desenvolvida, encontrando-se parcialmente acomodada.	Composta por canais 30%, cavidades 30%, câmaras 20% e fissuras 20%.	Presença de nódulos de ferro, nódulos de manganês e nódulos de carbonato de cálcio.
Bic1 21-33	Material grosseiro ocupando 20% da seção, enquanto material fino e poros ocupam 50 e 30% da seção respectivamente. Relação G/F - 2/5.	Porfírica aberta	Microestrutura de solo pedal composta por blocos subangulares, com grau de pedalidade moderadamente desenvolvida, encontrando-se parcialmente acomodada.	Composta por canais 20%, cavidades 20%, câmaras 30%, fissuras 25% e vesículas 5%.	Presença de nódulos de ferro, nódulos de manganês e nódulos de carbonato de cálcio.
Bic2 33-44	Material grosseiro ocupando 20% da seção, enquanto material fino e	Porfírica aberta e	Microestrutura de solo pedal composta por blocos subangulares, com grau de pedalidade fortemente	Composta por cavidades 30%, fissuras 40%,	Presença de nódulos de ferro, nódulos de manganês

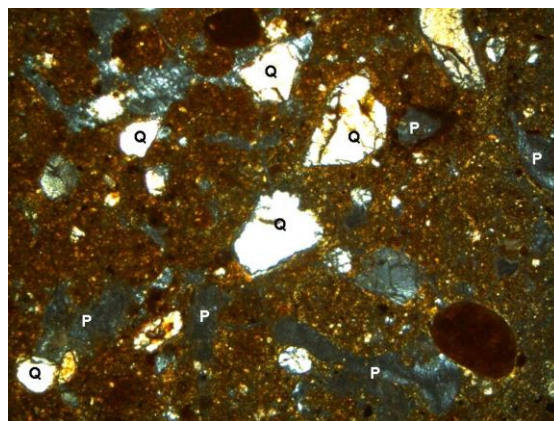
	poros ocupam 60 e 20% da seção respectivamente. Relação G/F - 1/3.	fechada	desenvolvida, acomodada.	encontrando-se	parcialmente	e	câmaras 20% e canais 10%.	e nódulos de carbonato de cálcio.
Bic2 38-50	Material grosseiro ocupando 20% da seção, enquanto material fino e poros ocupam 50 e 30% da seção respectivamente. Relação G/F - 2/5.	Porfírica aberta e fechada	Microestrutura de solo pedal subangulares, desenvolvida, acomodada.	com grau de pedalidade	fortemente	e	Composta por cavidades 50%, fissuras 20%, câmaras 20% e canais 10%.	Presença de nódulos de ferro, nódulos de manganês e nódulos de carbonato de cálcio.

Legenda: H: horizonte; P: profundidade; DR: distribuição relativa

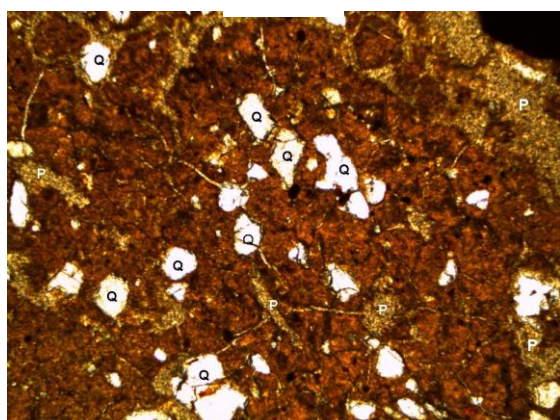
Figura 15 – Fotomicrografias evidenciando a distribuição relativa, obtidas em luz plana. Fotomicrocagrafias do lado esquerdo são referentes aos horizontes da área não irrigada (NIR) e as do lado direito são referentes aos horizontes da área irrigada (IR). (a) e (b) referentes aos horizontes Ac e Apc, (c) e (d) horizontes Bic1, (e) e (f) horizonte Bic2. Aumento de 5x.



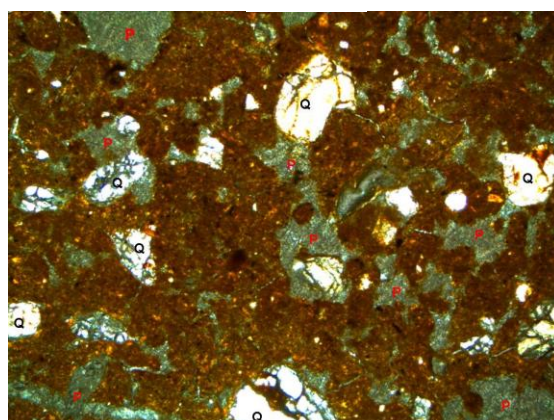
(a)



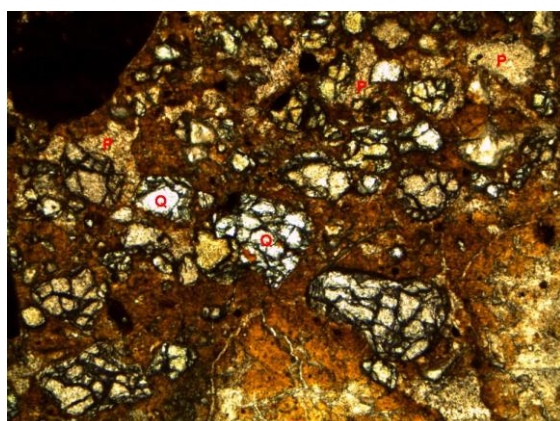
(b)



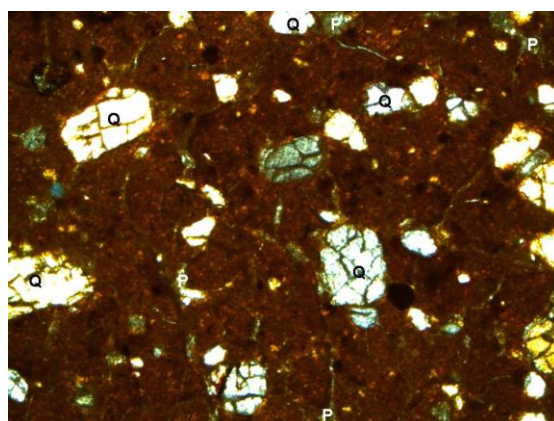
(c)



(d)



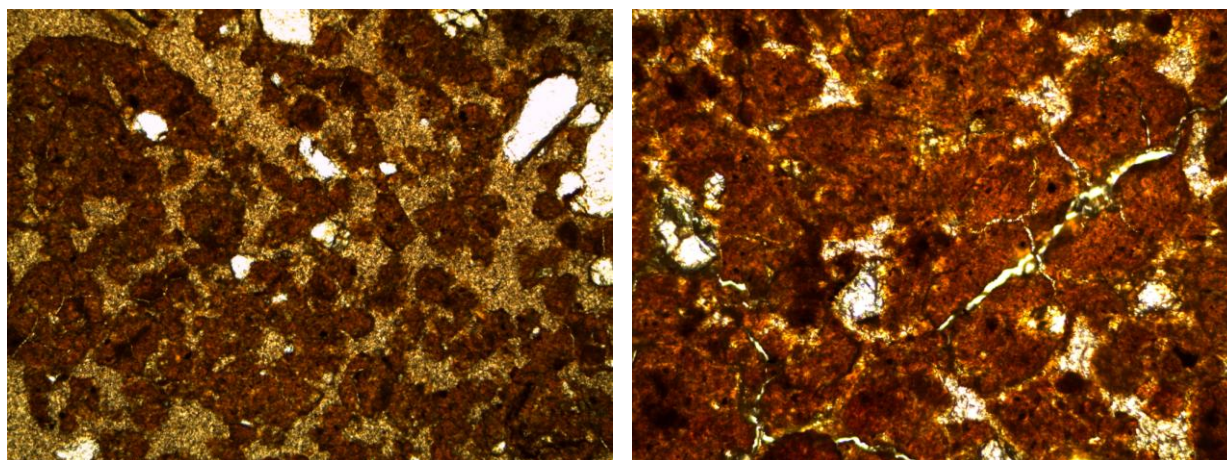
(e)



(f)

Legenda: Q: quartzo; P: poro.

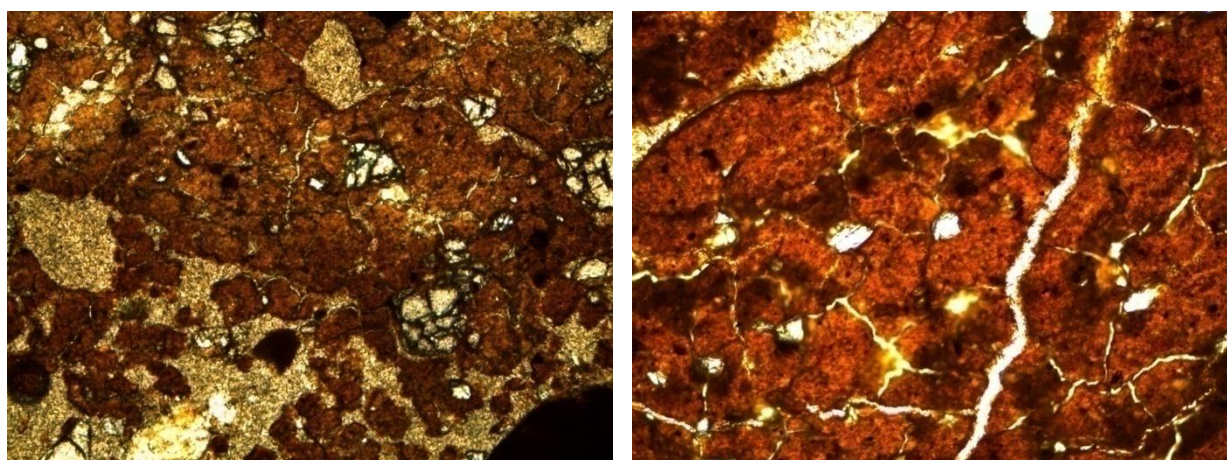
Figura 16 – Fotomicrografias dos horizontes Bic1 perfil 1 NIR (a) e Bic1 perfil 2 IR (b) evidenciando a microestrutura obtidas em luz plana. Aumento de 10x.



(a)

(b)

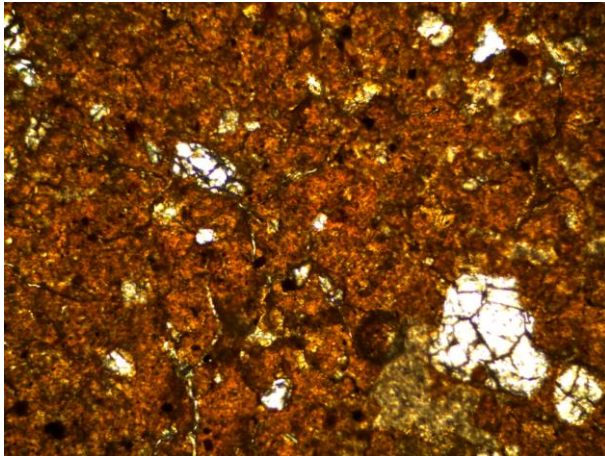
Figura 17 – Fotomicrografias dos horizontes Bic2 perfil 1 NIR (a) e Bic2 perfil 2 IR (b) evidenciando a microestrutura obtidas em luz plana. Aumento de 10x.



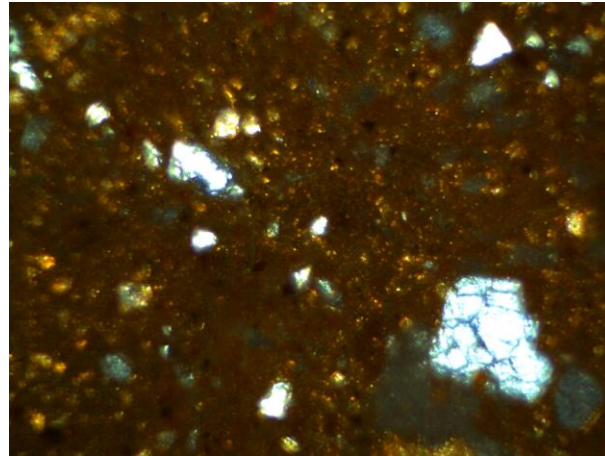
(a)

(b)

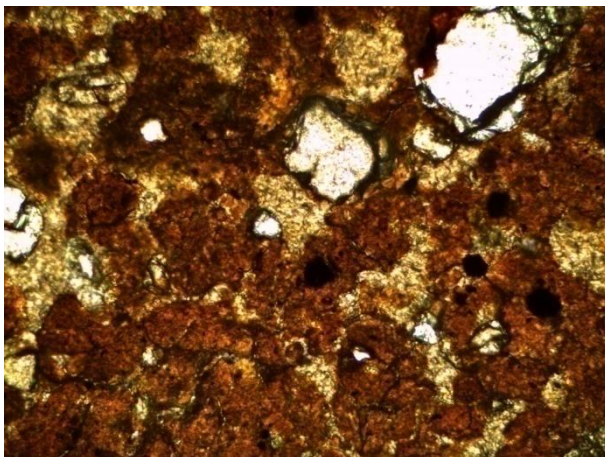
Figura 18 – Fotomicrografias dos horizontes Bic1 e Bic2 perfil 1 NIR (a) e (c) sob luz plana, (b) e (d) obtidas em nicóis cruzados mostrando a ausência de fábricas birrefringentes nesse perfil. Aumento de 10x.



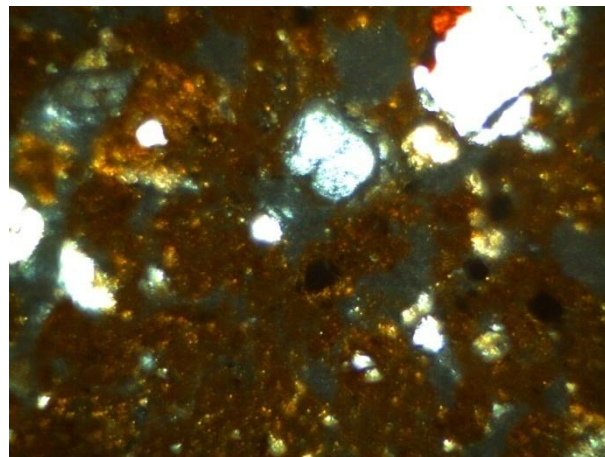
(a)



(b)

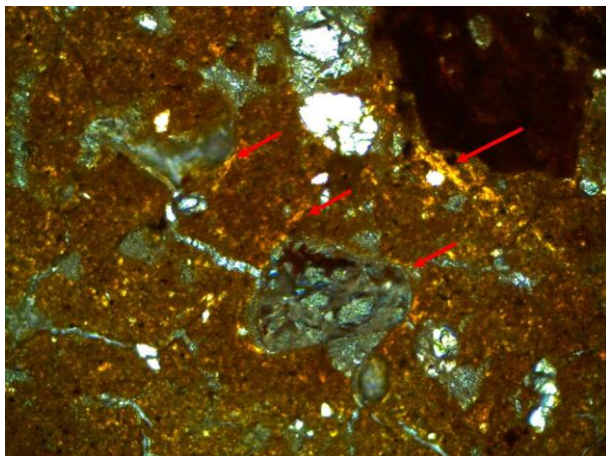


(c)

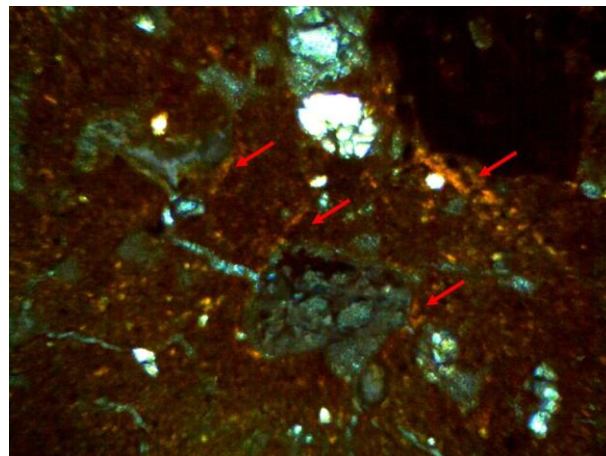


(d)

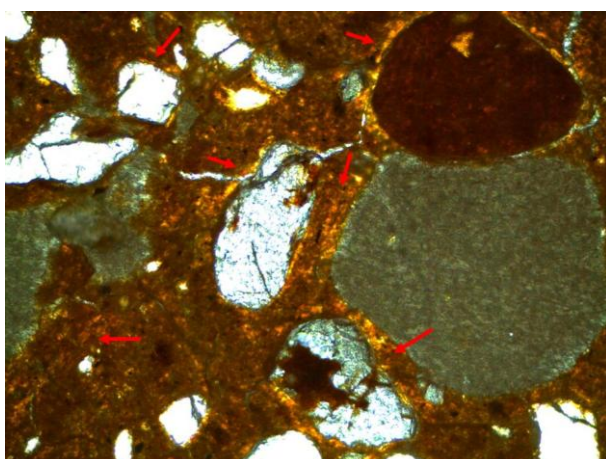
Figura 19 – Fotomicrografias dos horizontes Bic1 e Bic2 perfil 2 IR (a) e (c) sob luz plana, (b) e (d) obtidas em nicóis cruzados mostrando as fábricas birrefringentes indicadas pelas setas nesse perfil. Aumento de 10x.



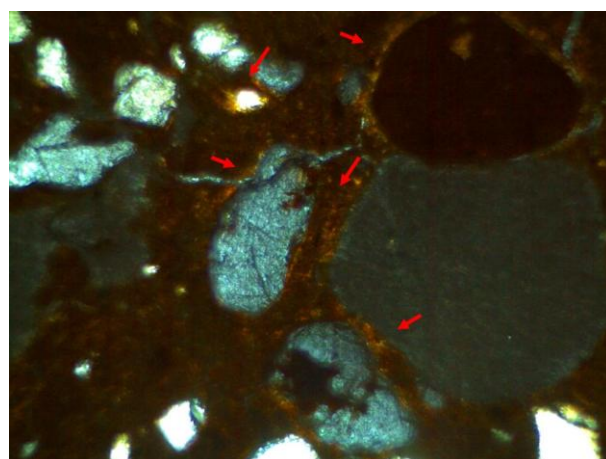
(a)



(b)



(c)



(d)

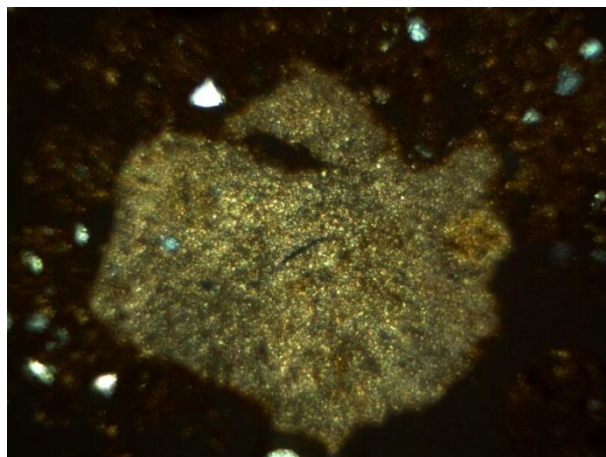
Com relação aos nódulos de carbonato de cálcio (Figura 20) os mesmos foram visualizados nos dois perfis, sendo observado que no perfil não irrigado a quantidade de nódulos é maior que no perfil irrigado, além disso, foi verificado que no solo do perfil não irrigado o CaCO_3 encontrava-se em grande parte impregnado no fundo matricial, fato este não observado no solo irrigado. Estas pedofeições estão de acordo com os dados químicos de equivalente de CaCO_3 e com a mineralogia da fração silte, no qual nos mesmos também evidenciam a ação da água no perfil irrigado, favorecendo a dissolução dessa feição.

De acordo com Monger *et al.* (1991), durante cada ciclo de umedecimento, alguns dos minerais de calcita ou outros tipos de carbonatos se dissolvem com o decorrer do tempo.

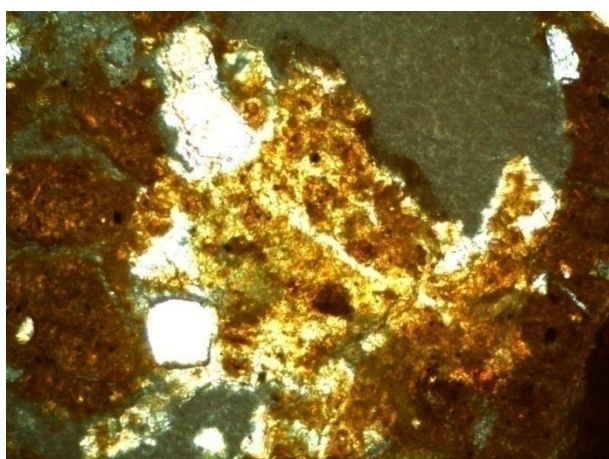
Figura 20 – Fotomicrografias evidenciando pedofeições amorfas de nódulos de carbonato de cálcio obtidas em luz plana e em nicóis cruzados. Fotomicrocografias (a) e (b) referentes aos horizontes Bic do perfil 1 NIR; (c) e (d) referentes ao horizonte Bic1, (e) e (f) referentes ao horizonte Bic2 do perfil 2 IR.



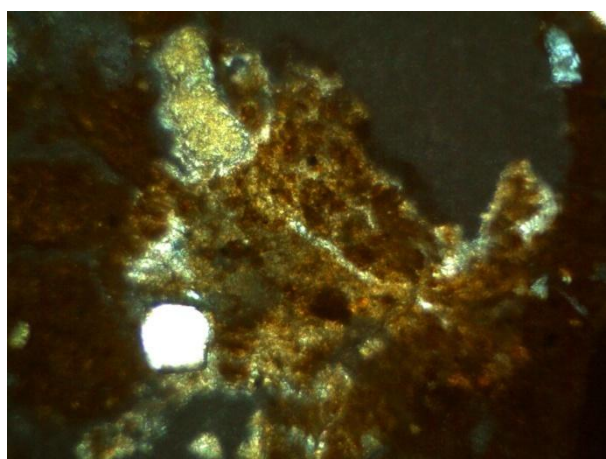
(a)



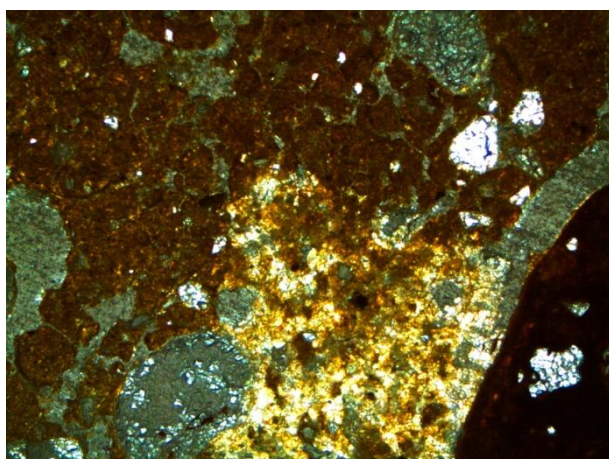
(b)



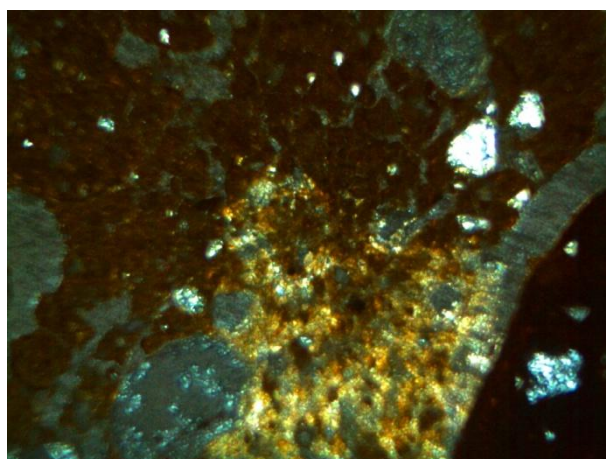
(c)



(d)

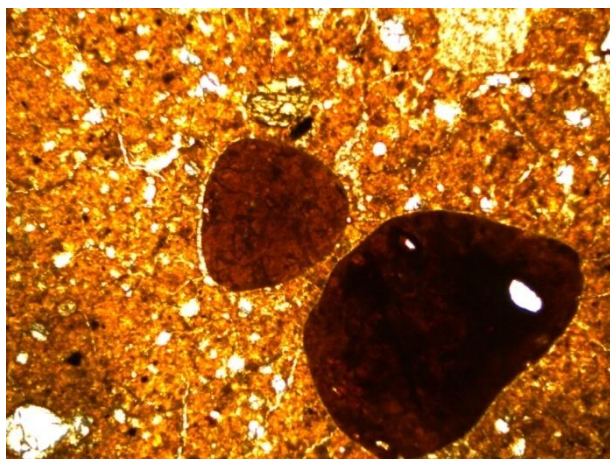


(e)

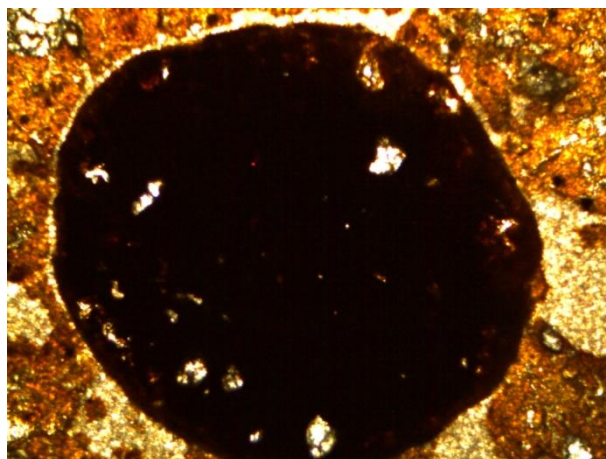


(f)

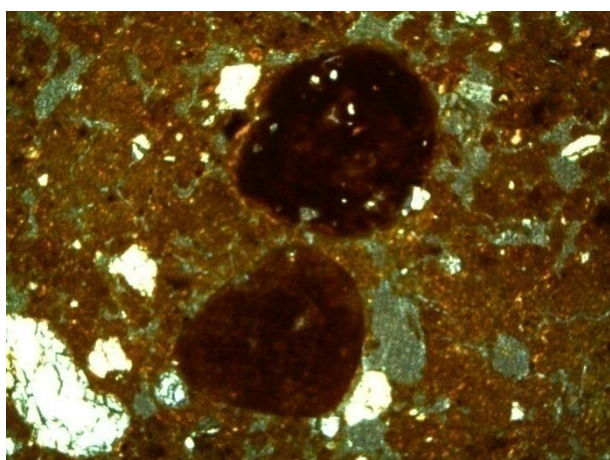
Figura 21 – Fotomicrografias evidenciando pedofeições amorfas de nódulos de ferro em luz plana. Fotomicrocografias (a) e (b) referentes aos horizontes Bic1 e Bic 2 do perfil 1 NIR; (c) e (d) referentes ao horizonte Bic1 e Bic2 do perfil 2 IR.



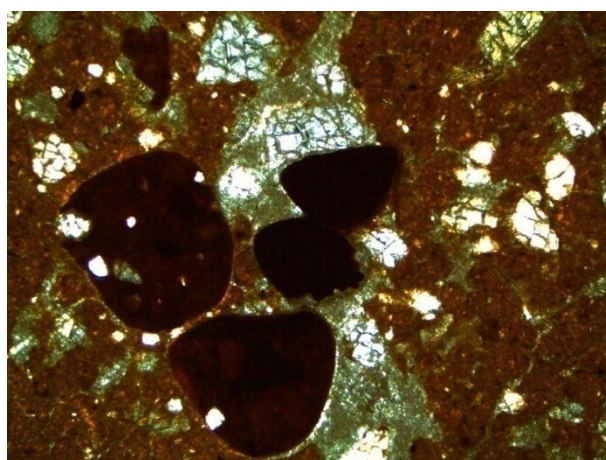
(a)



(b)



(c)



(d)

2.4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos comprovam que 23 anos de irrigação foram suficientes para causar mudanças nos atributos físicos, químicos, morfológicos, mineralógicos e ter causado mudança na classificação do solo.

A hidrólise intensificada pela irrigação ocasionou uma maior alteração do solo do perfil 2 (IR), sendo este fato evidenciado pela maior espessura do solum, aumento do conteúdo de argila, diminuição dos teores de silte, menor relação silte/argila, dissolução de CaCO_3 , indícios de maior quantidade de argila e de neoformação mineral (minerais 2:1 interestratificados), maior grau de pedalidade e maior presença de ferro cristalino.

Foi verificada no campo através das descrições morfológicas a presença cerosidade nos horizontes de subsuperfície do perfil irrigado, mas como não houve translocação de argila neste perfil, possivelmente associada pela ação flocculante do cálcio, a mesma foi classificada como superfícies de compressão, evidenciada pela maior fábrica birrefringente nesta área.

O perfil 2 (IR) foi classificado como Chernossolo Háplico Carbonático saprolítico, por apresentar horizonte A chernozênico seguido de horizonte B incipiente e possuir argila de atividade alta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, E.L.L. **Química e mineralogia de três pedons originários de calcário da Chapada do Apodi - CE**. Fortaleza, Universidade Federal do Ceará, 2002. 61p. (Tese de Mestrado).

ANA. 2007. **GEO Brasil**: recursos hídricos: resumo executivo. Ministério do Meio Ambiente; Agência Nacional das Águas; Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente: Brasília, 2007. 60p.

ANJOS, L.H.; FERNANDES, M.R.; PEREIRA, M.G. & FRANZMEIER, D.P. Landscape and pedogenesis of an Oxisol-Inceptisol- ultisol sequence in Southeastern Brazil. **Soil Sci. Soc.Am.J.**, 62:1651.1998.

BAUTISTA, F; PALACIO-APONTE, G; QUINTANA, P; ZINCK, J. A. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. **Geomorphology**. v. 135, p 308 – 321. 2011.

BELLANCA, A.; HAUSER, S.; NERI, R.; PALUMBO, B. Mineralogy and geochemistry of Terra Rossa soils, western Sicily: insights into heavy metal fractionation and mobility. **The Science of the Total Environment**, n.193, p. 56 – 57, 1996.

BLUME, H. P.; SCHWERTMANN. Genetic of profile distribution of aluminum, iron, and manganese oxides. **Soil Science Society of America, Proc.**, v. 33, p. 438-444.

BRASIL. **Levantamento Exploratório – Reconhecimento de solos do estado do Ceará**. Recife, Ministério da Agricultura. Divisão de Pesquisa Pedológica. Convênios MA/DNPA – SUDENE/DRN, MA/CONTAP/USAID/ETA, 1973. 502p. (Boletim técnico, 28).

BOERO, V. & SCHWERTMANN, U. Iron oxide mineralogy of Terra Rossa and its genetics. **Geoderma**, v.44,p. 319-327, 1989.

BUCKMAN, H.O. & BRADY, N.C. **Natureza e propriedade dos solos**. 7.ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1989.

BULLOCK et al. **Handbook for soil thin description**. Waine. 185p, 1985.

BULLOCK, P. & THOMPSON, M.L. Micromorphology of alfisols. In: DOUGLAS, L.A. & THOMPSON, M.L., eds. Soil micromorphology and soil classification. Madison, **Soil Science Society of America**, 1985. p.17-47. (Special Publication, 15).

BUOL, S.W.; HOLE, F.D.; McCracken, R.J. & SOUTHARD, R.J. **Soil Genesis and Classification**. 4. ed. Iowa, Ames, 1997. 527p.

CHRISTOFIDIS, D 2007. Agricultura irrigada sustentável no Semi-Árido e no Rio Grande do Norte. **ITEM**, Brasília, n.74/75, p. 62-67.

COLE, C.V.; OLSEN, S.R. & SCOTT, C.O. The nature of phosphate sorption by calcium carbonate. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 17:352-356, 1953.

CORREA, M.R. *et al.* Atributos químicos de solos sob diferentes usos em perímetro irrigado no semiárido de Pernambuco. **R. Bras. Ci. Solo**, 33:305-314, 2009.

DNOCS. DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS.

Perímetro irrigado Jaguaribe Apodi. Disponível em:

<http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/ce/jaguaribe_apodi.html>. Acesso em: 24 junho de 2012.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação do Solo**. Rio de Janeiro 2 ed, 306p. 2006.

ERNESTO SOBRINHO, F. **Caracterização, gênese e interpretação para uso de solos derivados de calcário da região da Chapada do Apodi, Rio Grande do Norte**. 1980. 133 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1980.

FEITOSA, E. C. **A exploração do aquífero Açú na região de Mossoró – RN:**

Caracterização da situação atual e perspectiva de atendimento da demanda futura (Programa de água subterrânea para a região nordeste – Série Hidrogeologia: Pesquisa e Desenvolvimento, 1). Brasília: CPRM, 1996. 44p, 1996

GUNAL, H. & RANSOM, M.D. Clay illuviation and calcium carbonate accumulation along a precipitation gradient in Kansas. **Catena** 68 (2006) 59–69.

IAC. Instituto Agronômico de Campinas. **Métodos de análises químicas, mineralógicas e física de solos**. Boletim técnico, nº 106. Campinas. 2009.

JACKSON, M.L. (Ed.) **Soil chemical analysis: a advanced course**. Madison: Chapman & Hall, 1969. 894p.

LACERDA, N.B. & OLIVEIRA, T.S. Agricultura irrigada e a qualidade de vida dos agricultores em perímetros do Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v.38, n.2, p.216-223, 2007.

LAVEUF, C.; CORNU, S.; BAIZE, D.; HARDY, M.; JOSIERE, O.; DROUIN, S.; BRUAND, A.; JUILLOT, F. Zinc redistribution in soil developed from limestone during pedogenesis. **Pedosphere**. v. 19, n.3, p. 292 – 304. 2009.

LEMOS *et al.* Evaluation of characteristics of cambisols derived from limestone in low tabelands in northeaster Brazil: Implication for management. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. n. 8, v. 32, p. 1997.

MANTOVANI, EC; BERNARDO, S; PALARETTI, LF 2007. **Irrigação: princípios e métodos**. Ed. UFV: Viçosa, 358p.

- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. (1960): **Iron oxide removal from soils and clays by dithionite systems buffered with sodium bicarbonate**. 7th Nat. Conf. Clay Minerals, 317-327.
- MENDONÇA, E. S. & MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV. 2005. 107p.
- MEURER, E.J. **Fundamentos de Química do solo**. 3.ed. Porto Alegre, Evangraf, 2006. 285p.
- MONGER, H.C; DAUGHERTY, L.A; LINDEMANN, W.C; LIDDELL, C.M. Microbial precipitation of pedogenic calcite. **Geology** 19:997-1000.1991.
- MORAIS, L.F.S. *et al.* Análise das águas subterrâneas nos municípios do Médio e Baixo Jaguaribe: mapeamento e estimativa da disponibilidade atual. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 36, n. 1, p. 34-43, 2005.
- MOREIRA, L.J.S. **caracterização de solos, concreções e nódulos ferruginosos em uma topossequência na chapada do Apodi – Ce**. 2012, 77p. Dissertação de mestrado (Agronomia - Solos e nutrição de plantas - UFC).
- MOTA, J. C. A. *et al.* Atributos mineralógicos de três solos explorados com a cultura do melão na Chapada do Apodi – RN. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.31, p. 445-454,2007.
- MUGGLER, C. C et al. Características pedológicas de ambientes agrícolas nos Chapadões do Rio Corrente, sudoeste da Bahia. **Pesquisa agropecuária brasileira**. v. 31, n. 03, p.221-232, 1996.
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- OLIVEIRA, C.V.; KER, J.C.; FONTES, L.E.F.; CURI, N. & PINHEIRO, J.C. Química e mineralogia de solos derivados de rochas do Grupo Bambuí no Norte de Minas Gerais. **R. Bras. Ci. Solo**, 22:583-593, 1998.
- OLIVEIRA, L.B; M. R. RIBEIRO, M. R.; F. B. FERRAZ, F. B; FERREIRA, M. G. V. X; & MERMUT, A. R. Mineralogia, micromorfologia e gênese de solos planossólicos do sertão do Araripe, estado de Pernambuco. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:665-678, 2004.
- OWLIAIE, H. R.; ABTAHI, A.; HECK, R. J. Pedogenesis and clay mineralogical investigation of soils formed on gypsiferous and calcareous materials, on a transect, southwestern Iran. **Geoderma**. v. 134, n. 1-2, p. 62-81, 2006.
- PAISANI, J. C.; HENDGES, E. R. Análise de imagens na quantificação de atributos micromorfológicos (microfábrica) de depósito de encosta. **Revista de Geografia**,v. 27, n. 3, p. 166 – 179, 2010.
- PRESLEY, D. R.; RANSOM, M. D.; KLUITENBERG, G. J.; FINNELL, P. R. Effects of thirty years of irrigation on the genesis and morphology of two semiarid soils in Kansas. **Soil Science Society of America**, v.68, p. 1916-1926, 2004.

RESENDE, M. **Nordeste: Ambiente agrícola, problemas e sugestões de pesquisa.** Mossoró, 1989. (Coleção Mossoroense, Série A, 29).

SAKURAI, K.; OHDATE, Y.; KYUMA, K. Factors affecting zero point of charge (ZPC) of variable charge soils. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.35, n.1, p.21-31, 1989.

SANTOS *et al.* **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 5ª Ed., Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, Viçosa, 100p, 2005.

SCHWERTMANN, U. Inhibitory effect of soil organic matter on the crystallization of amorphous ferric hydroxides. **Nature**, 1966. 212:645-646p.

SIX, J., BOSSUYT, H., DEGRYZE, S., DENEFF, K., 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil Tillage Res.** 79, 7-31

SOLIS, P. & TORRENT, J. Phosphate sorption by calcareous Vertisols and Inceptisols of Spain. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 53:456-459, 1989.

SPERA, S.T.; DENARDIN, J.E.; ESCOSTEGUY, P.A.V.; DOS SANTOS, H.P.; FIGUEROA, E.A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:2613-2620, 2008, Número Especial.

YASSOGLOU, N.; KOSMAS, C.; MOUSTAKAS, N. The red soils, the origin, properties and use and management in Greece. **Catena**, v. 28, p. 267 – 278, 1997.

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis.** New York, v.19. p.1467-1476, 1988.

WANG, M.K. & TZOU, Y.M. Phosphate sorption by calcite, and iron-rich calcareous soils. **Geoderma**, 65:249-261, 1995.

WIETHÖLTED, S. Histórico e perspectivas da prática de calagem no Brasil. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro. **Anais.** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. (CDROM, seção temática 4 - Palestras).

3 CAPÍTULO 2: ALTERAÇÕES EM ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS CALCÁRIOS DO SEMIÁRIDO CEARENSE APÓS VINTE E TRÊS ANOS DE IRRIGAÇÃO .

RESUMO

A água consiste em um recurso essencial para a vida e para os ecossistemas. As regiões semiáridas sofrem cada vez mais com a escassez de água, por esse motivo a prática de irrigação vem possibilitando a expansão das fronteiras agrícolas em muitas regiões áridas e semiáridas do globo, inclusive no Nordeste brasileiro, o que leva a preocupação de como essa prática afeta direta ou indiretamente o recurso solo, de maneira a prejudicar o próprio ecossistema como um todo. O objetivo deste trabalho foi investigar os efeitos causados por 23 anos de irrigação sobre os atributos químicos de solos calcários localizados na Chapada do Apodi, Ceará. Para o estudo foram realizadas 8 tradagens em área sob irrigação há 23 anos e em área sem irrigação. Amostras de solos foram coletadas nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm. Os atributos químicos analisados foram potencial hidrogeniônico (pH), cálcio, magnésio, potássio, sódio, fósforo, acidez potencial (H+Al), condutividade elétrica, equivalente de carbonato de cálcio e carbono orgânico. Os resultados indicam terem ocorrido diferenças significativas na área sob irrigação há 23 anos quando comparada à área não irrigada. O processo de dissolução de CaCO_3 , parece ter sido intensificado na área irrigada assim como a decomposição do material orgânico. Foi constatado ainda o aumento dos teores de cálcio, sódio e fósforo na área sob irrigação.

Palavras-chave: irrigação, dissolução de CaCO_3 , propriedades químicas.

ABSTRACT

Water is a finite resource more essential to life and to ecosystems. The semiarid regions suffer increasing shortages of water, therefore the practice of irrigation has enabled the expansion of agricultural frontiers in many arid and semiarid regions of the globe, including in northeast Brazil, which leads to concern about how this practice directly or indirectly affects soil resource, so damages the ecosystem as a whole. The objective of this study was to investigate the effects caused by 23 years of irrigation on the chemical properties of calcareous soils located in Chapada do Apodi, Ceará. For the study 8 samples were taken in area under irrigation for 23 years and in areas without irrigation. Soil samples were collected at 0-20, 20-40 and 40-60 cm. Chemical characteristics were analyzed hydrogen potential (pH), calcium, magnesium, potassium, sodium, phosphorus, potential acidity (H + Al), electrical conductivity, calcium carbonate equivalent and organic carbon. The results indicate significant differences have occurred in the area under irrigation for 23 years when compared to non-irrigated area. The process of dissolution of CaCO_3 , appeared to be intensified in the area irrigated and the decomposition of organic material. It was also found increased levels of calcium, sodium and phosphorus in the area under irrigation.

Keywords: irrigation, CaCO_3 dissolution, chemical properties.

3.1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso finito, vulnerável e essencial para sustentação da vida, e do meio ambiente. No Brasil a região semiárida tem uma área de aproximadamente 900.000 km², cerca de 10% da área total do país, tendo como principais fatores marcantes o solo, a vegetação e o clima que é quente e seco, com duas estações, a seca e a chuvosa, sendo que a maior parte das chuvas ocorre nos quatro primeiros meses do ano, acarretando, na maioria das vezes, um balanço hídrico negativo e elevado índice de aridez (ARAÚJO FILHO *et al.* 1995).

A falta de água em áreas áridas e semiáridas é algo preocupante na agricultura, pois se torna um fator limitante para o desenvolvimento das culturas, fazendo-se necessária a busca por estratégias para combater essa escassez.

Segundo Gomes (1997), a irrigação consiste em uma prática agrícola de fornecimento de água para as culturas, quando as formas naturais de fornecimento não são suficientes para atender as necessidades hídricas das plantas.

Nas regiões áridas e semiáridas, a irrigação é uma das tecnologias mais importantes para a garantia da produção agrícola (MACHADO *et al.* 2007), sendo fundamental para o aumento da produtividade e desenvolvimento agrícola dessas regiões, onde são fortemente limitadas pela irregularidade pluviométrica (SANTOS; RIBEIRO, 2002).

No entanto, não se encontram apenas benefícios com o uso da irrigação. Seu mau uso intensifica a exploração da terra, pois mais de três culturas podem ser exploradas em rápida sucessão, podendo acarretar desgaste do solo e conseqüentemente a modificação das suas propriedades químicas.

A modificação do regime climático do solo demonstra ter vários efeitos sobre suas propriedades e processos. Entretanto as mudanças resultantes da irrigação nestes parâmetros variam e são muito dependentes da qualidade da água (PRESLEY *et al.* 2004).

De acordo com Wiethölted (1997), a adição de água via irrigação, acelera o processo de acidificação do solo, pela lixiviação de cátions de reação básica (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e Na⁺). Ongley (2000) afirma que, com a expansão das áreas irrigadas, crescem também os problemas de degradação dos recursos naturais (solo e água), principalmente devido à salinidade e a sodicidade do solo.

Estudos indicam que o uso da irrigação pode tanto aumentar como diminuir os estoques de carbono orgânico do solo (COS) (FOLLETT, 2001; DE BONA *et al.* 2006).

Entretanto apesar da crescente intensificação de áreas irrigadas no nordeste do Brasil poucos são os estudos sobre os efeitos que a irrigação pode causar nos atributos do solo, principalmente no Estado do Ceará

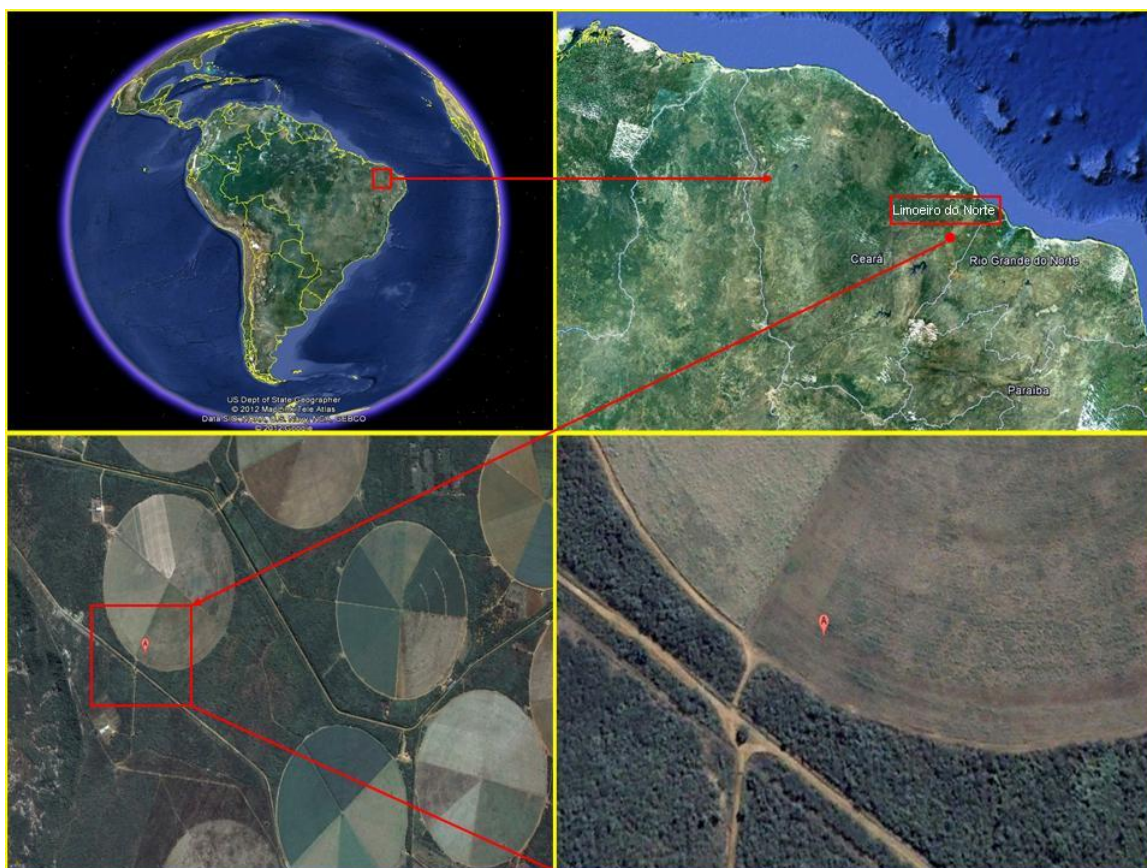
Neste contexto, o presente trabalho parte da hipótese de que 23 anos de irrigação afetam atributos químicos do solo. Assim, o objetivo foi investigar os efeitos causados por 23 anos de irrigação sobre os atributos químicos de um solo calcário, localizado na Chapada do Apodi, Ceará.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização e histórico das áreas de estudo

As áreas escolhidas para o estudo estão localizadas no perímetro irrigado na Chapada do Apodi no município de Limoeiro do Norte-CE (Figura 1). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo BSw'h', caracterizado por ser muito quente e semiárido (BRASIL, 1973). A temperatura média anual é de 28,5 °C, com mínima de 22 °C e máxima de 35 °C. A precipitação média anual é 772 mm, registrando-se uma distribuição de chuvas muito irregular no tempo. A umidade relativa média é de 62% e a evapotranspiração atinge a média anual de 3.215 mm (DNOCS, 2012).

Figura 22 – Imagem de satélite das áreas avaliadas no perímetro irrigado da Chapada do Apodi, localizada no município de Limoeiro do Norte, Ceará.



Fonte: Google Earth.

A Chapada do Apodi faz parte da bacia Potiguar, onde as unidades estratigráficas estão representadas predominantemente pela formação do calcário Jandaíra com espessura média de 250 a 300 m no topo e pelo arenito Açú, na base (FEITOSA, 1996). O suprimento hídrico do perímetro é assegurado pelo rio Jaguaribe, perenizado pelo Açude de Orós, com capacidade de 2.100.000.000 m³ e derivação por meio da barragem de Pedrinhas, no Rio Quixeré. Além disso, existe um grande número de poços que são fonte de abastecimento de água potável para comunidades urbanas e rurais na região (MORAIS *et al.* 2005).

Para o presente estudo foram avaliadas duas áreas: área cultivada com capim que é irrigada por sistema de aspersão tipo pivot central (05°12'26,3" S e 38°02'30" W), e uma área externa e limítrofe ao pivô que não recebe irrigação (05°12'27,5 S e 38°02'30,7" W), distantes 40 metros uma da outra.

A área de pivô é irrigada durante 12 horas por dia, recebendo aproximadamente 0,44 mm/h, dando um total de 5,28 mm por dia e 1.927,2 mm por ano. Considerando-se a média histórica de precipitações pluvias dos últimos 25 anos que foi de 748,7 mm, tem-se que por ano são aplicados via irrigação e precipitação pluvial um total de 2.675,9 mm na área irrigada.

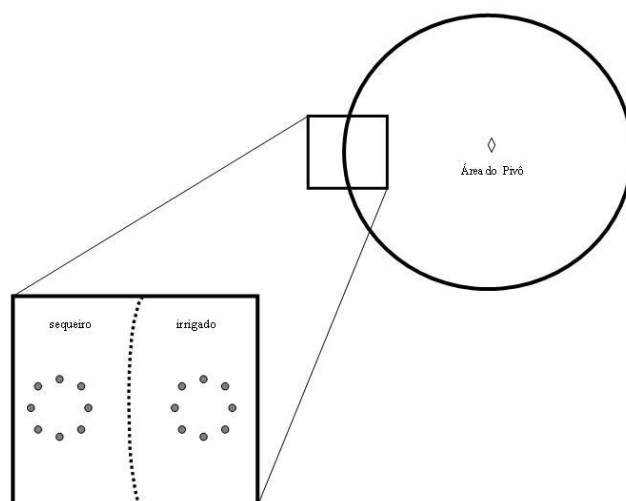
Na área irrigada os animais permanecem por 12 horas diariamente e a área não irrigada é usada como descanso e circulação para eles, sendo observado que na mesma, assim como a área irrigada, encontra-se gramínea como vegetação. A área de capim possui 50 ha, e é cultivada há 10 anos com capim tifton (*Cynodonniemfluesis*) e irrigada há aproximadamente 23 anos. A adubação química é feita por fertirrigação com ureia e superfosfato simples, sendo a ureia aplicada a cada ciclo de pastejo. A adubação orgânica é realizada com o esterco dos animais na própria área. Há utilização de máquinas na ocasião da fenação: roçadeira, enleiradeira, enfardadeira e tratores. A área foi anteriormente cultivada com milho por cerca de 5 anos.

3.2.2 Amostragem

A amostragem foi realizada em julho de 2011. Foram realizadas 8 tradagens, em cada área nas profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm, totalizando 48 amostras (2 tratamentos x 3 profundidades x 8 repetições) (Figura 23). As amostras foram coletadas em sacos plásticos, identificadas, colocadas para secar ao ar e em

seguida destorroadas e peneiradas em tamis de malha de 2,0 mm, a fim de se obter terra fina seca ao ar (TFSA).

Figura 23 – Esquema mostrando o plano de amostragem que foi utilizado nas áreas de estudo. Os pontos indicam a disposição das tradagens. A divisão pontilhada entre as duas áreas indica a cerca. A distância entre o local de tradagens e a cerca é de 20 m para as duas áreas



Fonte: Arquivo pessoal.

3.2.3 Procedimentos analíticos

3.2.3.1 Análises químicas

As análises químicas realizadas seguiram a metodologia descrita no Manual de Análises de Solo (EMBRAPA, 1997).

O pH foi em água determinado potenciométricamente por meio de eletrodo imerso em suspensão solo: líquido, na relação 1: 2,5.

Os cátions cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) trocáveis foram extraídos por cloreto de potássio (KCl 1 M) e determinados por compleximetria. O potássio (K^+) e o sódio (Na^+) trocáveis foram extraídos com solução de Mehlich 1 e determinados por espectrofotômetro de chama.

O fósforo foi extraído com solução de Mehlich 1 e determinado por espectrofotometria. O alumínio (acidez trocável), foi extraído com solução de cloreto de

potássio (KCl 1M) e determinado por compleximetria com hidróxido de sódio (NaOH 0,025 M) na presença de azul-de-bromotimol como indicador.

O alumínio e o hidrogênio, acidez potencial ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ no solo), foram extraídos com solução de acetato de cálcio ($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Ca} \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0,05 M) e determinados por compleximetria com hidróxido de sódio (NaOH 0,025 M), na presença do indicador fenolftaleína 3%.

O hidrogênio, acidez não trocável (H^+), foi determinado pela diferença algébrica entre a acidez potencial e a acidez trocável.

Os valores da soma de bases (SB), da capacidade de troca de cátions (T) e da porcentagem de saturação em bases (V%) foram calculados com base nos dados químicos obtidos.

A condutividade elétrica foi determinada pelo método do extrato de saturação, através da preparação da pasta saturada.

O equivalente de carbonato de cálcio foi determinado através do ataque da amostra de solo com excesso de solução padrão de HCL 0,5N e posterior titulação do excesso de ácido com a solução de NaOH 0,25N. A diferença entre os volumes adicionados e os titulados representou o percentual de CaCO_3 na amostra.

Para determinação do carbono orgânico total, utilizou-se a metodologia proposta por (YEOMANS; BREMNER, 1988) e adaptada por (MENDONÇA; MATOS, 2005), em que a oxidação da matéria orgânica se processa em via úmida.

3.2.3.2 Análise estatística

As análises estatísticas dos dados foram feitas no programa ASSISTAT (Assistência Estatística), e os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando o experimento em parcelas subdivididas. Foi aplicado o teste de Tukey em nível de 1% e 5% de probabilidade.

Também foram empregadas técnicas multivariadas de análise de componentes principais (ACP). Para esta análise foram considerados os atributos pH, cálcio, sódio, acidez, CTC, soma de base, porcentagem de saturação por bases, fósforo, matéria orgânica, condutividade elétrica e equivalente de carbonato de cálcio, nas camadas de 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm. Com a ACP para esses atributos foram gerados 11 componentes.

A matriz de correlação dos atributos com os 11 componentes considerou-se o nível de significância de 5% de probabilidade para, então, serem selecionados os atributos tidos como significativos que apresentam alta correlação com o componente principal em que se encontram. Os atributos selecionados apresentaram correlação de no mínimo 0,6 em módulo, em pelo menos um dos componentes principais com exceção do magnésio e o potássio que foram excluídos, pois apresentaram correlação menor que 0,6 com os fatores principais. Foi feita uma nova ACP, gerando 2 componentes principais (CP1 e CP2), que explicaram 87,01% da variância dos dados originais. Para a análise de agrupamento das variáveis utilizou-se o método de Ward, com a medida euclidiana para a distância entre os casos nos grupos.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Atributos químicos

As médias dos atributos químicos avaliados nas duas áreas (não irrigada e irrigada) estão apresentadas na Tabela 7 e na Figura 24. A análise estatística revelou haver diferenças significativas para quase todos os parâmetros analisados em nível de 1% de probabilidade, entre as duas áreas avaliadas (com exceção do K^+ em nível de 5% de probabilidade, e do pH e o Mg^{2+} que não tiveram diferença significativa).

Os valores médios de Ca^{2+} e Mg^{2+} encontram-se elevados nas duas áreas, quando comparados a outras bases, este fato pode ser explicado pela origem calcária desses solos (BRASIL, 1981). Comparando os valores de Ca^{2+} entre as duas áreas observa-se que na área irrigada os mesmos encontram-se mais elevados em todas as profundidades (Figura 25). A maior concentração de cálcio na área irrigada pode estar relacionada à maior capacidade de dissolução do calcário nesta área, onde a mesma pode ser observada pela diminuição dos valores do equivalente de carbonato de cálcio. Tendo em vista que os principais produtos da dissolução do $CaCO_3$ são os íons cálcio (Ca^{2+}) e carbonato (CO_3^{-2}) a liberação de cálcio durante a reação deverá favorecer o domínio das formas trocáveis deste cátion.

No que se refere à SB, verifica-se maiores valores na área irrigada (Tabela 7), devido ao complexo de troca estar basicamente ocupado por esta base, que se encontra com maiores teores nessa área.

Em relação ao Mg^{2+} observa-se que não houve diferença significativa entre as áreas avaliadas (Tabela 7). Outro fato observado é que os valores de Ca^{2+} nos dois solos

foram sempre maiores do que os de Mg^{2+} . Este resultado pode ser explicado pela série de retenção de cátions que determina que o Ca^{2+} é mais fortemente retido na matriz coloidal do solo do que o Mg^{2+} (QUAGGIO, 2000).

Apesar dos baixos teores de Na^+ encontrados nas duas áreas (Figura 24) e pela ausência de salinidade ou sodicidade, os resultados evidenciam que os teores desse cátion, assim como a porcentagem de saturação por sódio (Figura 24), sofreram um aumento significativo com os 23 anos de irrigação, resultado também observado em solos irrigados durante aproximadamente 30 anos no Kansas (PRESLEY *et al.* 2004).

Apesar de se evidenciar aumento de sódio na área irrigada, não se observou aumento da condutividade elétrica na mesma e sim um decréscimo quando comparada com a área não irrigada (Figura 24). A média da condutividade elétrica do solo em sequeiro foi de 0,32 dS/m, enquanto a média do solo irrigado foi de 0,18 dS/m, sendo a diminuição na área irrigada da ordem de 88,8 %.

Estes dados indicam que os anos de irrigação favoreceram um incipiente processo de solonização na área. Este fato pode estar relacionado à qualidade da água de irrigação proveniente do Rio Jaguaribe e classificada por Cruz (2001) como C_1S_2 , de acordo com a classificação da UCCC (1974). Essa classificação significa que em relação à condutividade elétrica a água é de baixa salinidade (C_1) e em relação à sodicidade a água possui um conteúdo médio de sódio (S_2), o qual pode ter ocasionado o aumento do conteúdo de sódio na área irrigada.

Sabe-se que excesso de sódio em solos de áreas irrigadas pode causar uma variedade de problemas, dentre eles, a degradação da estrutura do solo e dispersão das argilas. A estrutura do solo quando degradada leva à redução da infiltração e da condutividade hidráulica do solo (PRESLEY *et al.* 2004; BAGARELLO *et al.* 2006). A redução da condutividade hidráulica, por sua vez, não afeta apenas como a água se move no perfil do solo, mas também pode afetar o movimento desta na paisagem (COPPOLA *et al.* 2004).

Observa-se também um aumento de Na^+ em profundidade ocasionado pelo uso contínuo da irrigação, provavelmente pela intensificação do processo de lixiviação do elemento e seu subsequente acúmulo em profundidade no solo. Dantas *et al.* (2012), também observaram esse fenômeno em duas áreas irrigadas cultivadas com banana e milho/soja na Chapada do Apodi.

Ao contrário do observado para o sódio, os teores de K^+ diminuem em profundidade (Figura 24), nas duas áreas. Na área não irrigada os valores de K^+ foram

maiores do que na área irrigada em todas as profundidades (Figura 24). Reduções significativas nos teores de K^+ trocável do solo sob irrigação estão também provavelmente relacionados à perda de K^+ por lixiviação, provocado pela irrigação. Os menores valores de V% encontrados nesta área corroboram esta hipótese (Tabela 7).

Para o pH, observa-se na Tabela 7 que não houve variação desse atributo nas duas condições de solo analisadas, sendo o mesmo classificado com alcalino. Entretanto com relação à acidez potencial (H+Al) observa-se que houve diferença significativa entre as duas áreas, no qual na área não irrigada não foi detectada acidez potencial (Tabela 7). Esse comportamento diferenciado nas duas áreas pode indicar uma ação pouco mais intensa da hidrólise na parcela irrigada. Os maiores valores de CTC encontrados nesta área corroboram esta hipótese (Tabela 7) uma vez que a hidrólise de minerais primários existentes pode favorecer a síntese de minerais de argila.

De maneira geral os valores de carbono orgânico encontram-se altos nas duas áreas (Tabela 7). Isto decorre da presença de carbonato de cálcio nessas áreas e consequentemente de íons Ca^{2+} , que é considerado essencial para a estabilização da matéria orgânica em solos calcários (CLOUGH; SKJEMSTAD, 2000), devido a interações organominerais proporcionados por este íon. Segundo Baldock e Skjemstad, (2000) esta interação favorece a formação de agregados estáveis protegendo a matéria orgânica do solo e as frações mais finas do mesmo.

Tabela 7. Valores médios referentes à caracterização química entre as duas áreas analisadas.

Área	pH	Mg^{2+}	SB	H+Al	T	V%	CO	
		-----cmol _c kg ⁻¹ -----						g.kg ⁻¹
Não irrigada	8,27 a	0,00 b	14,95 b	0,00 b	14,95 b	100,00 a	15,27 a	
Irigada	8,36 a	0,088 a	16,40 a	0,088 a	16,49 a	99,47 b	11,74 b	

Médias seguidas de mesma letra, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Verifica-se o decréscimo dos teores de carbono orgânico (CO) (Figura 24) e consequentemente matéria orgânica (MO) em profundidade dos dois solos analisados (Figura 24), provavelmente este comportamento é devido à redução na quantidade de raízes, importantes fontes de MO. No entanto, observa-se que ocorreu diferença significativa entre as duas áreas avaliadas, onde o solo sob condições irrigadas os teores de MO e CO foram menores que no solo não irrigado (Figura 24 e Tabela 7). Apesar de ser encontrada maior quantidade de cálcio na área irrigada como foi observado

anteriormente, este fator não foi suficiente para manter protegido o estoque de matéria orgânica nessa área quando comparado ao da área não irrigada.

A irrigação normalmente resulta no aumento da adição de biomassa vegetal produzida pelas culturas, podendo, entretanto, intensificar a decomposição microbiana da matéria orgânica por aumentar o conteúdo de água no solo. Em regiões tropicais a perda de carbono orgânico é intensificada devido à ocorrência de elevadas temperaturas e umidade (MIELNICZUK *et al.* 2003). Provavelmente, a baixa umidade do solo na área não irrigada, desfavoreça o processo de mineralização da MO mantendo assim seus teores mais elevados (DUENHAS *et al.* 2002).

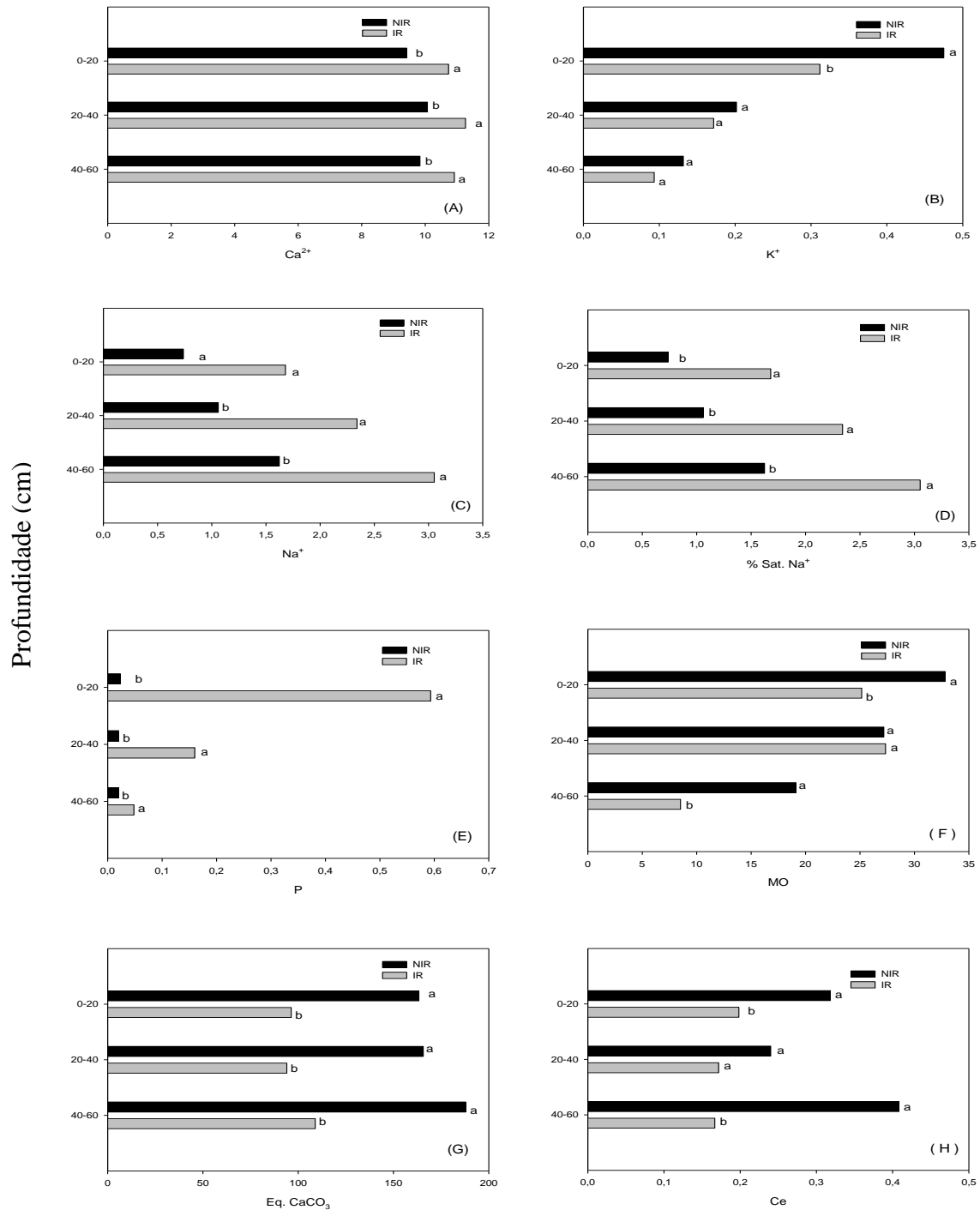
De Bona *et al.* (2006) avaliando o efeito da irrigação sobre a dinâmica da MO e sobre os estoques de C orgânico de um Argissolo Vermelho da Depressão Central do Rio Grande do Sul, verificou que a irrigação pode diminuir o armazenamento de CO₂, estimulando diretamente a atividade microbiana e a decomposição da matéria orgânica.

Com relação às médias dos teores de equivalente carbonato de cálcio (CaCO₃), observa-se que as mesmas tiveram diferença significativa quando comparadas entre as duas áreas (Figura 24). Na área irrigada os valores de CaCO₃ foram menores que na área não irrigada nas três profundidades (Figura 24). Verifica-se que os 23 anos de irrigação proporcionaram ao solo uma maior dissolução do CaCO₃. A dissolução do CaCO₃ libera para a solução do solo Ca²⁺ e 2HCO₃⁻.

De acordo com Deneff (2008), dependendo da quantidade e da qualidade da água de irrigação, bem como o método de aplicação, a irrigação pode dissolver carbonatos ou promover sua precipitação nos solos.

Khokhlova *et al.* (1997) estudaram o efeito da irrigação sobre carbonatos de cálcio em solos encontrados na Rússia e constataram que trinta anos de irrigação resultaram em: descalcificação na parte superior do solo, desaparecimento das acumulações de carbonato nos horizontes superiores e aumento dos teores de cálcio e magnésio na solução do solo, corroborando os resultados aqui encontrados.

Figura 24. Teores de cálcio (A), potássio (B), sódio (C), saturação por sódio (D), fósforo (E), matéria orgânica (F), equivalente de carbonato de cálcio (G) e condutividade elétrica (H), nas duas áreas analisadas: área não irrigada (NIR) e área irrigada (IR) e nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm.



3.3.2. Análise de componentes principais (ACP)

A análise de componentes principais (ACP) foi realizada na matriz de dados constituída de 11 variáveis. A escolha do número de fatores pode levar em conta diferentes critérios, sendo um destes a seleção de autovalores superiores a 1 (VICINI, 2005). Assim, foram selecionados dois componentes, cujos valores próprios foram superiores a 1. Estes dois componentes possuem autovalores que correspondem a 66,53% e 20,48% da variância total, ou seja, explicam juntos 87,01% das variações das medias originais (Tabela 8).

Tabela 8 - Autovalores e percentual da variância explicada por cada componente.

Número de componentes	Autovalores			
	Extração dos componentes principais			
	Autovalores	% da variância explicada	Autovalores acumulados	% da variância explicada acumulada
1	7,31	66,53	7,31	66,53
2	2,25	20,48	9,57	87,01

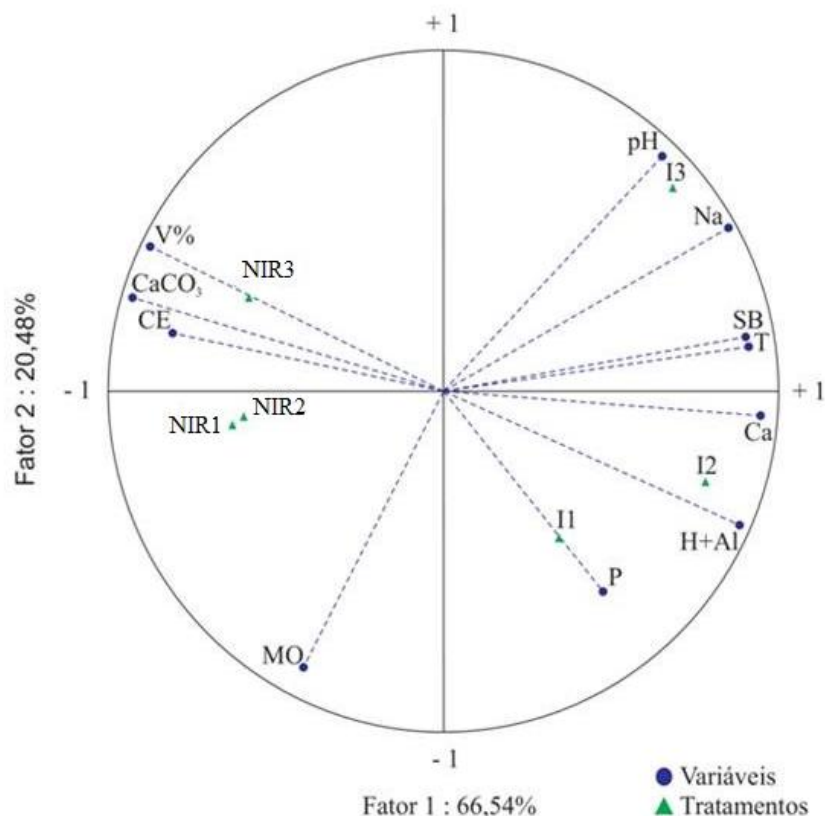
A correlação das variáveis analisadas com os componentes principais está apresentada na Tabela 9. Observa-se que as variáveis que mais contribuiram para o CP1 foram pH, cálcio, sódio, acidez potencial (H+Al), CTC, soma de base, saturação por base, condutividade elétrica e equivalente de carbonato de cálcio. Para o CP2 foi somente pH, fósforo e a matéria orgânica.

Tabela 9 - Correlação dos atributos analisados com os componentes principais (CP) obtidos a partir dos atributos analisados.

Variável	CP1	CP2
pH	0,66	0,69
Cálcio	0,95	-0,07
Sódio	0,85	0,48
H+Al	0,89	-0,39
CTC	0,92	0,13
Soma de base	0,91	0,16
Saturação por base	-0,88	0,42
Fósforo	0,48	-0,60
Matéria orgânica	-0,42	-0,82
Condutividade elétrica	-0,82	0,17
CaCO ₃	-0,94	0,28

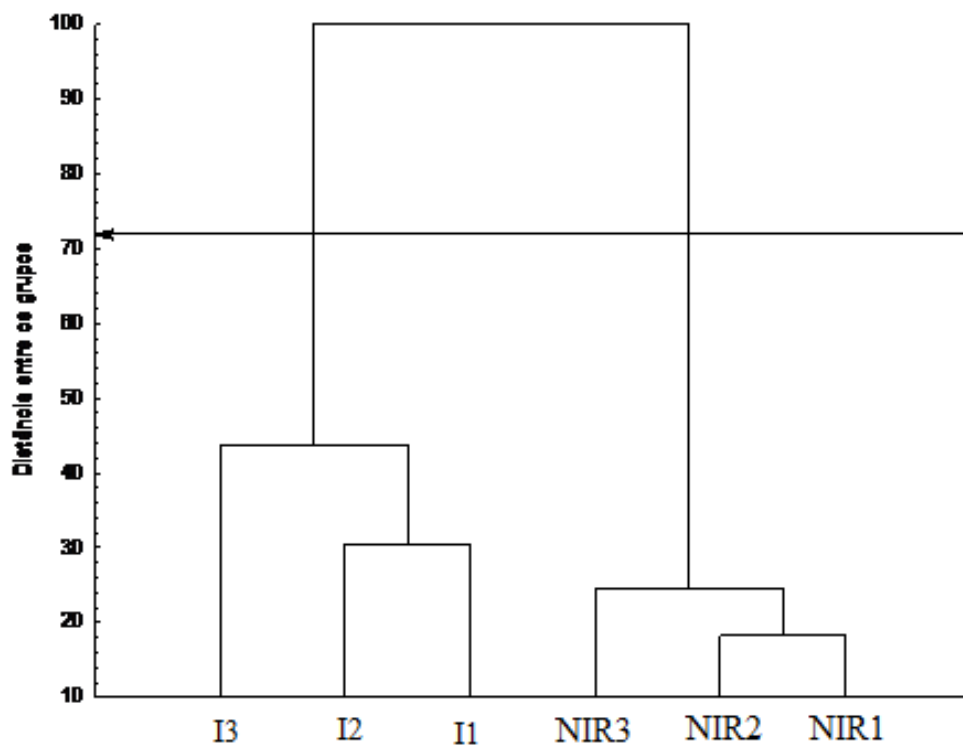
Observando-se a Figura 25, verifica-se que praticamente todas as variáveis encontram-se próximas ao círculo unitário, indicando assim boa contribuição aos componentes principais; já os tratamentos referentes à área não irrigada nas três profundidades encontram-se mais afastados do círculo unitário. A área não irrigada na profundidade de 40-60 cm foi correlacionada mais fortemente com as variáveis CaCO_3 , e saturação por base. Já nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm essa área se correlacionou melhor com a variável matéria orgânica. A área irrigada na profundidade de 0-20 cm e 20-40 cm se correlacionou melhor com as variáveis cálcio e H+Al e na profundidade de 40-60 cm teve influência das variáveis pH, sódio, soma de base e CTC.

Figura 25 - Dispersão dos atributos químicos em duas áreas (não irrigada e irrigada). Na = sódio; SB = soma de base; T = capacidade de troca de cátions; Ca = cálcio; H+Al = acidez potencial; P = fósforo; MO = matéria orgânica; CE = condutividade elétrica; CaCO_3 = equivalente carbonato de cálcio; V% = saturação por base. NIR1, NIR2 e NIR3 corresponde a área não irrigada e I1, I2 e I3 corresponde área irrigada cujas profundidades são respectivamente 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm em todos.



Através do dendrograma, que apresenta a dissimilaridade entre os grupos formados a partir das análises dos atributos químicos do solo, pode-se observar a formação de dois grupos (Figura 26), um formado pela área irrigada nas três profundidades e o outro formado pela área não irrigada nas três profundidades. Fica evidente a distinção entre os tratamentos, assim como a similaridade entre as profundidades, corroborando com os resultados das análises e com o círculo unitário.

Figura 26 – Dissimilaridade entre os grupos estabelecida por distância euclidiana a partir dos atributos pH, cálcio, sódio, acidez potencial, CTC, soma de base, saturação por base, fósforo, matéria orgânica, condutividade elétrica e equivalente de carbonato de cálcio. I1, I2 e I3 correspondem a área irrigada e NIR1, NIR2 e NIR3 a área não irrigada, ambos respectivamente nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm.



3.4 CONCLUSÕES

Os 23 anos de irrigação parecem ter intensificado de forma sutil os processos de lixiviação (K e Na), hidrólise, solonização, decomposição de matéria orgânica e dissolução de CaCO_3 na área irrigada. A análise estatística revelou haver diferenças significativas em quase todos os parâmetros químicos analisados quando comparada à área irrigada com a área que não recebe irrigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO FILHO, J.A., SOUSA, F.B., CARVALHO, F.C. Pastagens no semi-árido: Pesquisa para o desenvolvimento sustentável. In: SIMPÓSIO SOBRE PASTAGENS NOS ECOSISTEMAS BRASILEIROS: Pesquisa para o desenvolvimento sustentável, 1995. Brasília, DF. **Anais...** Brasília:SBZ, 1995. p.63-75.

BALDOCK, J.A., SKJEMSTAD, J.O. 2000. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic material against biological attack. **Organic Geochemistry**, p. 697-710.

BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; PALAZZOLO, E.; PANNO, M. & REYNOLDS, W.D. Field and laboratory approaches for determination sodicity effects on saturated soil hydraulic conductivity. **Geoderma**, 130:1-13, 2006.

BRASIL. **Ministério das Minas e Energias**. Secretaria-Geral. Projeto RADAMBRASIL. Folhas SB. 24/25 Jaguaribe/Natal; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1981. 744p.

CLOUGH, A., SKJEMSTAD, J.O., 2000. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate. **Aust. J. Soil Res.** 38, 1005–1016.

COPPOLA, A., SANTINI, A., BOTTI, P., VACCA, S., COMEGNA, V., SEVERINO, G. Methodological approach for evaluating the response of soil hydrological behavior to irrigation with treated municipal wastewater. **Journal of Hydrology** 292, 114–134. 2004.

CRUZ, M.G.M. **Avaliação da qualidade das águas superficiais e subterrâneas do distrito de irrigação Jaguaribe-Apodi**. 2001. 66 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

DANTAS, J.D.N.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S.; ASSIS, C.P. Qualidade de solo sob diferentes usos e manejos no Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodi, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.1, p.18–26, 2012

DE BONA, F.D., BAYER, C., BERGAMASCHI, H., DIECKOW, J. Soil organic carbon in sprinkler irrigations systems under no-till and conventional tillage. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, 30, 911–919. 2006.

DENEFF, K; STEWART, C.E.; BRENNER, J; PAUSTIAN, K. Does long-term center-pivot irrigation increase soil carbon stocks in semi-arid agro-ecosystems? **Geoderma** 145 121–129. (2008).

DNOCS. DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS. **Perímetro irrigado Jaguaribe Apodi**. Disponível em: <http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/ce/jaguaribe_apodi.html>. Acesso em: 24 junho de 2012.

DUENHAS, L.H.; VILLAS BÔAS, R.L.; SOUZA, C.M.P.; RAGOZO, C.R.A.; BULL, L.T. Fertirrigação com diferentes doses de NPK e seus efeitos sobre a produção de frutos de laranja (*Citrus sinensis* O.) 'Valência'. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal-SP, v.24, n.1, p.214-218, 2002.

EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro, 212p. 1997.

FEITOSA, E. C. **A exploração do aquífero Açu na região de Mossoró – RN**: Caracterização da situação atual e perspectiva de atendimento da demanda futura (Programa de água subterrânea para a região nordeste – Série Hidrogeologia: Pesquisa e Desenvolvimento, 1). Brasília: CPRM, 1996. 44p, 1996

FOLLETT, R.F. Soil management concepts and soil carbon sequestration in cropland soils. **Soil & Tillage Research** 61, 77–92. 2001

GOMES, H.P. **Engenharia de irrigação**. 2. ed. Campina Grande: UFPB, 412p. 1997.

KHOKHLOVA, O.S.; ARLASHINA, E.A.; KOVALEVSKAYA, I.S. The effect of irrigation on the carbonate status of Chernozems of Central Precaucasus (Russia). **Soil Technology** 11 (1997) 171-184.

MACHADO, R.; AGUIAR NETTO, A. O; CAMPECHE, L. F. S. M; BARROS, A. C. Efeito da Salinidade em Características Físico-Hídricas em Solos Salino-Sodilizados no Perímetro Irrigado Jabiberi-SER. **Agricultura Irrigada**, v.1, n.1, p.15–19, 2007.

MENDONÇA, E. S. & MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV. 2005. 107p.

MIELNICZUK, J. et al. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V., V.H. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p.209-248, 2003.

MORAIS, L.F.S .; FILHO, F.C.R. ; CORDEIRO, W.; FIGUEIREDO, M.C.B.; ROSA, M.F. Análise das águas subterrâneas nos municípios do Médio e Baixo Jaguaribe: mapeamento e estimativa da disponibilidade atual. **Revista Ciência Agronômica**, v. 36, n. 1, p. 34-43, 2005.

ONGLEY, E.D. **Controle da poluição da água pelas atividades agrícolas**. Tradução de GHEYI, H.R.; DAMASCENO, F.A.V.; BRITO, L. T. de L. Campina Grande: UFPB, 2000. 92 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 55).

PRESLEY, D.R., RANSOM, M.D., KLUITENBERG, G.J., FINNELL, P.R. Effects of thirty years of irrigation on the genesis and morphology of two semiarid soils. **Soil Science Society of America Journal** 68, 1916–1926. 2004.

QUAGGIO, J.A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2000. 111p.

SANTOS, E. E. F. & RIBEIRO, M. R. Influência da irrigação e do cultivo nas propriedades químicas de solos da região do submédio São Francisco. **Revista Acta Scientiarum**. 24:1507-1516. 2002.

UCCC-University of California Committee of Consultants. Guidelines for interpretation of water quality for agriculture. Davis: **University of California**, 1974. 13p. Documento.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. Santa Maria: UFSM, 2005. 215 p. (Monografia de Especialização).

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v.19. p.1467-1476, 1988.

WIETHÖLTED, S. Histórico e perspectivas da prática de calagem no Brasil. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. (CDROM, seção temática 4 - Palestras).

4 CAPÍTULO 3: ALTERAÇÕES FÍSICAS EM UM SOLO IRRIGADO POR VINTE E TRÊS ANOS NA CHAPADA DO APODI, CEARÁ.

RESUMO

A irrigação, que consiste em uma técnica agrícola de fornecimento controlado de água, vem sendo utilizada há muitos anos com o intuito de assegurar a produtividade agrícola. Em regiões semiáridas esta prática pode causar modificações nas propriedades do solo, dentre elas a estrutura que consiste em um atributo físico que tem relação com várias outras características do solo, como densidade, porosidade e estabilidade de agregados, sendo esse atributo bastante afetado pelos ciclos de umedecimento e secagem proporcionados pela irrigação nessas regiões. O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações causadas pela irrigação nos atributos físicos de um solo irrigado durante 23 anos, situado na Chapada do Apodi, Ceará. Foram avaliadas duas áreas, uma irrigada por sistema de aspersão tipo pivô central e outra externa ao pivô que não é irrigada. Foram realizadas 8tradagens em cada área nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm. Quatro amostras de solo com estrutura indeformada também foram coletadas em cada área. Os atributos físicos analisados foram densidade de partículas, densidade do solo, granulometria, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, permeabilidade do solo ao ar, resistência do solo à penetração, estabilidade de agregados e índices de continuidade poros. Os resultados indicaram que o solo irrigado sofreu alterações dos seus atributos físicos em relação ao solo não irrigado, sendo observada uma melhor agregação no solo da área irrigada, fato associado às maiores quantidades de ciclo de umedecimento e secagem nessa área. Foi também verificada diminuição da permeabilidade do solo ao are a formação de poros menos contínuos ou mais tortuosos nesta área.

Palavras-Chave: ciclos de umedecimento e secagem, permeabilidade do solo ao ar e índices de continuidade de poros.

ABSTRACT

The irrigation, a technique which consists in agricultural controlled delivery of water, has been used many years ago in order to ensure agricultural productivity. In semi-arid regions this practice can cause changes in soil properties, among them the structure that consists of a physical attribute that is related to several other soil characteristics such as density, porosity and aggregate stability, and this attribute is greatly affected by cycles of wetting and drying provided by irrigation in these regions. The objective of this study was to evaluate changes caused by irrigation in the physical attributes of a soil irrigated for 23 years, located in Chapada do Apodi, Ceará. We evaluated two areas, irrigated by a sprinkler system center pivot and an outer that the pivot is not irrigated. For the study eight samples in each area at 0-20, 20-40 and 40-60 cm. Four undisturbed structure samples were collected in each area. The physical attributes were analyzed for particle density, bulk density, grain size, porosity, macroporosity, microporosity, soil permeability to air, soil resistance to penetration, aggregate stability and pore continuity indices. The results indicated that the soil irrigated unchanged physical attributes relative to non-irrigated soil, better aggregation was observed in the soil of the irrigated area, a fact associated with higher amounts of wetting and drying cycle that area. It was also observed decrease in the air permeability of the soil and the formation of pores less tortuous or more continuous in this area.

Keywords: cycles of wetting and drying, soil permeability to air and pore continuity indices.

4.1 INTRODUÇÃO

O solo como sistema multi-fásico e complexo, contém em sua fase sólida partículas de tamanho areia, silte e argila as quais encontram-se geralmente ligadas entre si, formando unidades estruturais chamadas de agregados ou peds (SOILSURVEY STAFF, 1993). Em um sentido mais amplo, a distribuição do tamanho dos agregados, a sua estabilidade, quantidade, distribuição e tamanho do espaço poroso entre e dentro dos agregados caracterizam a estrutura do solo (SIX *et al.* 2004). Sendo assim, a estrutura do solo possui grande influência sobre diferentes processos como o movimento de água no solo, a transferência de calor e aeração. Sob a ótica da pedologia, os agregados que fazem parte da estrutura do solo, são os resultados mais estáveis que os processos pedogenéticos podem criar dentro de um horizonte do solo (SCHOENEBERGER *et al.* 2002) e, portanto, uma das características morfológicas de maior peso para a classificação de solos.

Entretanto, sabe-se que a estrutura do solo pode ser alterada por diferentes fatores, muitas vezes mediada por ações antrópicas. Neste contexto, a intensa irrigação do solo em áreas áridas e semiáridas destaca-se como uma das alterações antrópicas mais proeminentes nestas regiões climáticas. A adoção da irrigação nas regiões semiáridas pode causar modificações na umidade atual dos solos dessas áreas e alterar propriedades (porosidade, a estrutura, a densidade do solo e a condutividade hidráulica) e processos dos solos contribuindo para significativas mudanças nos mesmos (COELHO, 1992).

A alteração do ciclo hidrológico natural em resposta ao uso da irrigação modifica o regime de umidade do solo e pode, portanto, alterar e ou intensificar processos naturais (lixiviação, translocação e adição de sais solúveis). Da mesma forma, a estrutura do solo, assim como as propriedades a ela relacionadas, pode ser influenciada pelo novo ciclo hidrológico fazendo com que as partículas do solo sejam rearranjadas durante a secagem (BULLINGER-WEBER, *et al.* 2007). Estudos prévios indicam (SARTORI *et al.* 1985; PAGLIAI *et al.* 1987) que os ciclos de umedecimento e secagem podem causar alterações no sistema de poros e induzir a agregação do solo.

Além disso, os ciclos de umedecimento e secagem podem afetar a resistência do solo à penetração, a coesão das partículas, o tamanho dos agregados e a sua estabilidade mecânica (RAJARAM; ERBACH, 1999). Estes ciclos podem ainda resultar

na formação de agregados em solos desagregados (TELFAIR *et al.* 1957; NEWMAN E THOMASSON, 1979).

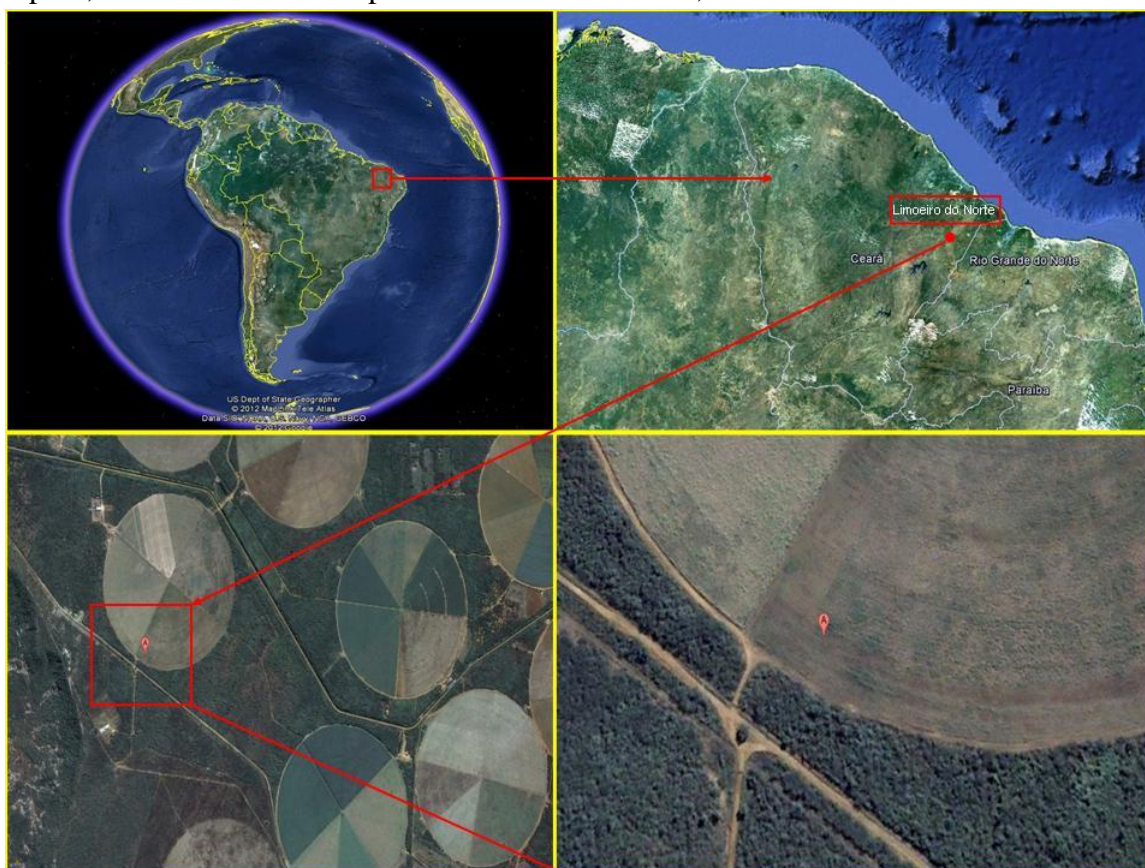
Com base no exposto, o presente estudo parte da hipótese de que 23 anos de irrigação em solos calcários do semiárido causam alterações em atributos físicos do solo diretamente relacionados à estrutura do solo. Assim, o objetivo foi verificar até que ponto a irrigação e seus consequentes ciclos de umedecimento e secagem alteram atributos físicos de um solo irrigado há 23 anos na Chapada do Apodi, Ceará.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Localização e histórico das áreas de estudo

As áreas escolhidas para o estudo estão localizadas no perímetro irrigado na Chapada do Apodi no município de Limoeiro do Norte-CE (Figura 1). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo BSw'h', caracterizado por ser muito quente e semiárido (BRASIL, 1973). A temperatura média anual é de 28,5 °C, com mínima de 22 °C e máxima de 35 °C. A precipitação média anual é 772 mm, registrando-se uma distribuição de chuvas muito irregular no tempo. A umidade relativa média é de 62% e a evapotranspiração atinge a média anual de 3.215 mm (DNOCS, 2012).

Figura 27 – Imagem de satélite das áreas avaliadas no perímetro irrigado da Chapada do Apodi, localizada no município de Limoeiro do Norte, Ceará.



Fonte: Google Earth, 2012.

A Chapada do Apodi faz parte da bacia Potiguar, onde as unidades estratigráficas estão representadas predominantemente pela formação do calcário Jandaíra com espessura média de 250 a 300 m no topo e pelo arenito Açú, na base (FEITOSA, 1996). O suprimento hídrico do perímetro é assegurado pelo rio Jaguaribe, perenizado pelo Açude de Orós, com capacidade de 2.100.000.000 m³ e derivação por meio da barragem de Pedrinhas, no Rio Quixeré. Além disso, existe um grande número de poços que são fonte de abastecimento de água potável para comunidades urbanas e rurais na região (MORAIS *et al.* 2005).

Para o presente estudo foram avaliadas duas áreas: área cultivada com capim que é irrigada por sistema de aspersão tipo pivot central (05°12'26,3" S e 38°02'30" W), e uma área externa e limítrofe ao pivô que não recebe irrigação (05°12'27,5 S e 38°02'30,7" W), distantes 40 metros uma da outra.

A área de pivô é irrigada durante 12 horas por dia, recebendo aproximadamente 0,44 mm/h, dando um total de 5,28 mm por dia e 1.927,2 mm por ano. Considerando-se a média histórica de precipitações pluvias dos últimos 25 anos que foi de 748,7 mm, tem-se que por ano são aplicados via irrigação e precipitação pluvial um total de 2.675,9 mm na área irrigada.

Na área irrigada os animais permanecem por 12 horas diariamente e a área não irrigada é usada como descanso e circulação para eles, sendo observado que na mesma, assim como a área irrigada, encontra-se gramínea como vegetação. A área de capim possui 50 ha, e é cultivada há 10 anos com capim tifton (*Cynodon dactylon*) e irrigada há aproximadamente 23 anos. A adubação química é feita por fertirrigação com ureia e superfosfato simples, sendo a ureia aplicada a cada ciclo de pastejo. A adubação orgânica é realizada com o esterco dos animais na própria área. Há utilização de máquinas na ocasião da fenação: roçadeira, enleiradeira, enfardadeira e tratores. A área foi anteriormente cultivada com milho por cerca de 5 anos.

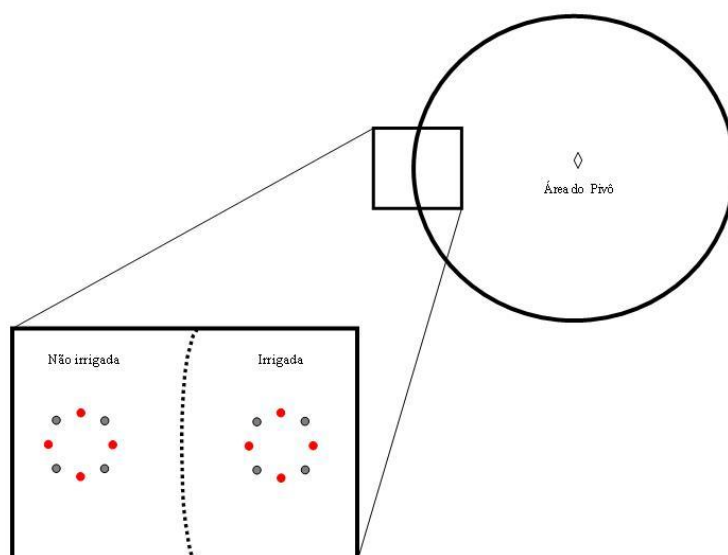
4.2.2 Amostragem

A amostragem foi realizada em julho de 2011. Foram feitas 8 tradagens, em cada área, nas profundidades: 0-20, 20-40 e 40-60 cm, totalizando 48 amostras (2 tratamentos x 3 profundidades x 8 repetições) (Figura 28). As amostras foram coletadas em sacos plásticos, identificadas, colocadas para secar ao ar, e em seguida destorroadas

e peneiradas em tamis de malha com abertura de 2,0 mm de diâmetro, a fim de se obter terra fina seca ao ar (TFSA).

Amostras de solo com estrutura indeformada também foram coletadas, 4 em cada área, utilizando-se anéis volumétricos (5 cm x 5 cm), nas profundidades: 0 -20 e 20-40 cm. Após estas etapas os solos foram analisados para a determinação dos seguintes parâmetros:

Figura 28 – Esquema mostrando o plano de amostragem que foi utilizado nas áreas de estudo. Os pontos indicam as tradagens sendo destacados os pontos nas cores vermelhas como locais onde foram coletadas amostras de solos com estrutura indeformada além das tradagens. A divisão pontilhada entre as duas áreas indica a cerca. A distância entre o local de tradagens e a cerca é de 20 m para as duas áreas.



Fonte: Arquivo pessoal

4.2.3 Procedimentos analíticos

4.2.3.1 Análises físicas

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, que se baseia na velocidade de deposição das partículas que compõem o solo, conforme a Lei de Stokes, utilizando-se como dispersante químico o hexametáfosfato de sódio (EMBRAPA, 1997).

A densidade das partículas foi determinada seguindo a metodologia do balão volumétrico, que consiste na determinação do volume de álcool etílico gasto para completar a capacidade de um balão de 50 mL, contendo 20 g de solo seco em estufa (EMBRAPA, 1997).

A densidade do solo foi determinada em amostras de solo com estrutura indeformada, coletadas com amostrador tipo Uhland e secas a 105 °C até massa constante (EMBRAPA, 1997). Conhecendo-se a densidade do solo e de partículas calculou-se a porosidade do solo pela equação:

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \right), \quad (1)$$

sendo α a porosidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), ρ_p e ρ_s a densidade de partículas e do solo (g cm^{-3}), respectivamente.

A separação da porosidade total em micro e macroporos foi feita aplicando-se uma tensão de 6 kPa sobre as amostras com estrutura indeformada, medindo-se o volume de água que permanece na amostra, que é igual ao volume de microporos. Conhecendo-se a porosidade total, calculou-se a macroporosidade por diferença.

Para realização da permeabilidade ao ar, as amostras com a estrutura indeformada foram colocadas em uma bandeja para serem saturadas, através da elevação gradual de uma lamina de água. Posteriormente as amostras foram submetidas a cinco tensões 2, 6, 10, 33 e 100 kPa. Após atingirem o equilíbrio, as amostras eram retiradas das placas e pesadas, e em seguida realizada a determinação da permeabilidade ao ar.

A permeabilidade do solo ao ar (K_{ar}) foi determinada utilizando-se o método da pressão decrescente (KIRKHAM, 1946; NEVES *et al.* 2007; SILVA *et al.* 2009; SILVEIRA *et al.* 2011). Nessa determinação foi utilizado um permeâmetro composto de um cilindro com capacidade de 30 litros, um transmissor de pressão e um sistema de aquisição de dados.

O método baseia-se no princípio da quantificação do decréscimo da pressão em função do tempo, o qual é proporcional ao fluxo de ar que atravessa a amostra de solo. O coeficiente de permeabilidade ao ar (K_{ar}) foi determinado a partir da equação:

$$K_{ar} = \frac{L\eta V}{AP_{atm}} \times |S|, \quad (2)$$

Sendo K_{ar} o coeficiente de permeabilidade ao ar (m^2), V o volume de ar no reservatório (m^3), η a viscosidade dinâmica do ar (Pa.s), L a altura do anel volumétrico (m), A a secção transversal da amostra de solo (m^2), P_{atm} a pressão atmosférica no nível do mar (Pa) e S o coeficiente angular da regressão linear da pressão (ln da pressão) em função do tempo.

A porosidade de aeração (ε_{ar}) foi calculada pela diferença entre a porosidade total estimada pela equação (1) e o conteúdo de água medido em cada potencial.

Os valores de permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) e os de porosidade de aeração (ε_{ar}) foram relacionados utilizando a equação de Kozeny-Carman, semelhante ao de Ahuja et al. (1984)

$$K_{ar} = M\varepsilon_{ar}^N \quad (3)$$

Onde M e N são constantes empíricas. Os autores consideraram o valor de N como um índice de continuidade de poros. A relação de K_{ar} e ε_{ar} foi ajustada para a forma logarítmica da equação:

$$\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar} \quad (4)$$

A relação linear pode ser caracterizada pela inclinação da reta (N), pelo intercepto com o eixo $\log K_{ar}$, no qual o $\log \varepsilon_{ar} = 0$ (M), e pelo intercepto com o eixo $\log \varepsilon_{ar}$, em que $\log K_{ar} = 0$ (ε_b) (RODRIGUES *et al.* 2011). O intercepto com o eixo $\log \varepsilon_{ar}$ (em que $K_{ar} = 1 \mu m^2$) é definido como a permeabilidade ao ar limitante e foi mencionado por Ball *et al.* (1988) e Schjønning *et al.* (2002) como o volume de poros de aeração bloqueados no solo que não faz parte do transporte convectivo de ar. Sendo assim, ε_b é o valor de porosidade de aeração ε_{ar} abaixo do qual o fluxo de ar através do solo cessa devido a descontinuidade da rede de poros de aeração. Partindo da equação anterior ε_b é obtido pela equação:

$$\varepsilon_b = 10^{(-\log M)/N}. \quad (5)$$

Groenevelt et al. (1984) também propuseram outro índice de continuidade de poros que tem por base a relação entre K_{ar} e ε_{ar} ,

$$K_1 = \frac{K_{ar}}{\varepsilon_{ar}}. \quad (6)$$

Após o equilíbrio na mesa de tensão (10 kPa), cada amostra com estrutura indeformada de solo foi pesada e realizada a resistência à penetração (RP). Nessa determinação foi utilizado um penetrômetro eletrônico da marca Marconi modelo 933, com receptor e interface acoplados a um computador, para registro das leituras por meio de um software próprio do equipamento.

A velocidade de penetração foi de 1 cm min⁻¹ (BRANDFORD, 1980), e os ensaios foram realizados com três repetições no centro de cada amostra. Os valores obtidos foram em kgf e posteriormente foram transformados em MPa.

A estabilidade de agregados foi determinada pelo método por via úmida, para medir a quantidade e distribuição dos agregados estáveis à agitação mecânica em água, relacionando-os com os que não se desintegram pelo peneiramento das amostras dispostas em um jogo de tamises de malhas com aberturas decrescentes com operação realizada de baixo de água (EMBRAPA, 1997). O cálculo da porcentagem de agregados estáveis na amostras:

$$\% \text{ de agregados estáveis} = [(\sum Ma - \sum Mp) / (Ms - Mw - \sum Mp)] * 100, \quad (7)$$

sendo Ma a massa dos agregados aparentes, Mp a massa das partículas primárias, Ms a massa da amostra original antes da tamisagem e Mw a massa de água na amostra original.

4.2.3.2 Análise estatística

As análises estatísticas dos dados foram feitas no programa ASSISTAT (Assistência Estatística), onde os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando o experimento em parcelas subdivididas. Foi aplicado o teste de Tukey em nível de 1% e 5% de probabilidade.

Também foram empregadas técnicas multivariadas de análise de componentes principais (ACP) para o entendimento de como os atributos interagiram. Foram considerados os atributos areia, argila, silte, densidade de partículas, densidade do solo, estabilidade de agregados, resistência à penetração, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, permeabilidade ao ar e índice de continuidade de poros nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm. Com a ACP para esses atributos foram gerados 13 componentes. À matriz de correlação dos atributos com os 13 componentes considerou-se o nível de significância de 5% de probabilidade para, então, selecionar os atributos tidos como significativos que apresentam alta correlação com o componente principal em que se encontram. Os atributos selecionados apresentaram correlação de no mínimo 0,6 em módulo, em pelo menos um dos componentes principais e, por este motivo, nenhum deles foi excluído. Foi feita uma nova ACP, gerando 3 componentes principais (CP1, CP2 e CP3), que explicaram 100% da variância dos dados originais. Para a análise de agrupamento das variáveis utilizou-se o método de Ward, com a medida euclidiana para a distância entre os casos nos grupos.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Textura, densidade das partículas, densidade do solo, estabilidade de agregados e resistência do solo à penetração.

A textura é uma das principais características do solo (Oliveira *et al.* 1992) e juntamente com a estrutura, compõem os principais parâmetros que afetam a porosidade do solo.

Os resultados da análise granulométrica encontram-se na Tabela 10. De acordo com as frações encontradas verifica-se que as duas áreas estudadas apresentaram mesma classe textural, sendo a mesma classificada conforme EMBRAPA (2006), como textura franco-argilosa.

A classe textural de um solo é uma característica importante de um solo porque varia muito pouco ao longo do tempo. Muitas vezes a mudança só ocorre se houver mudança da composição do solo devido a processos de intemperismo, que ocorrem em escala de séculos a milênios (REINERT; REICHERT, 2006). Portanto, pode-se dizer que o uso do solo através da irrigação afeta muito pouco a textura de um solo, implicando no fato de áreas com classes texturais similares.

Tabela 10. Valores médios de argila, silte e areia nas duas áreas analisadas (não irrigada e irrigada).

Áreas	Profundidade (cm)	Textura (g kg ⁻¹)		
		Argila	Areia	Silte
Não irrigada	0-20	370	283	347
	20-40	350	267	383
	40-60	378	269	353
Irigada	0-20	316	327	357
	20-40	319	291	390
	40-60	323	295	382

A análise estatística para os dados de densidade de partículas (Tabela 11) revelou diferença significativa entre as áreas em todas as profundidades. Valores maiores de densidade de partículas foram encontrados na área irrigada, estando esses valores inversamente relacionados com o conteúdo de carbono orgânico, visto que na área irrigada foram encontrados menores valores de matéria orgânica (Ver capítulo 2). A matéria orgânica possui uma massa específica menor do que a massa de um volume igual de sólidos minerais. Por isso, a quantidade desse componente no solo, exerce influencia marcante na densidade de partículas do mesmo (BRADY, 1983). Outra

explicação para essa maior densidade de partículas na área irrigada é devido ao maior conteúdo de areia nesta área nas três profundidades, visto que o principal componente desta fração é o quartzo, com densidade específica entre 2,65 a 2,66 g cm⁻³, o que eleva o valor da densidade das partículas.

Tabela 11. Valores médios de densidade de partículas do solo.

Áreas	Profundidade (cm)			Média
	Densidade de partículas (g cm ⁻³)			
	0-20	20-40	40-60	
Não irrigada	2,52 bA	2,47 bA	2,53bA	2,51 b
Irigada	2,62aA	2,63aA	2,62 aA	2,63 a

Média seguida pela mesma letra minúscula na coluna, e mesma letra maiúscula na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para densidade do solo não houve diferença significativa entre as áreas estudadas, mostrando que a irrigação não afetou esse parâmetro físico do solo sugerindo a manutenção da qualidade física do solo (Tabela 12). Apesar de não ter sido observada diferença entre as áreas observa-se a densidade do solo encontra-se com valores próximos aos considerados críticos, pois de acordo com Reichert *et al.* (2003), a densidade do solo crítica para algumas classes texturais, dentre elas para solos franco-argilosos é de 1,40 a 1,50 g cm⁻³.

Os altos valores de densidade e a não ocorrência de diferença significativa entre esses solos, podem estar relacionadas ao pisoteio dos animais, visto que a área irrigada é de pastagem e a área não irrigada serve de repouso e circulação para os mesmos.

Tabela 12. Valores médios de densidade do solo.

Áreas	Densidade do solo (g cm ⁻³)		Média
	Profundidade (cm)		
	0-20	20-40	
Não irrigada	1,41 aA	1,36 aA	1,38 a
Irigada	1,38 aA	1,39 aA	1,39 a

Média seguida pela mesma letra minúscula na coluna, e mesma letra maiúscula na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quanto à estabilidade de agregados, de acordo com Gavande (1976), ela é expressa pela distribuição de tamanho de agregados, pode ser utilizada para se avaliar a qualidade estrutural do solo, uma vez que a estabilidade da estrutura está relacionada à

resistência que os agregados do solo apresentam à influência desagregante da água e forças mecânicas.

Os valores médios de estabilidade de agregados encontram-se na Tabela 13. Observa-se que não houve diferença significativa entre a interação áreas x profundidade, mas ocorreu diferença estatística entre as áreas com maior valor médio de agregados estáveis na área irrigada.

A maior porcentagem de agregados estáveis da área irrigada deve estar relacionada aos dois processos da formação de agregados: floculação e cimentação, onde a floculação é o processo de aproximação das partículas primárias que pode ser proporcionada pela ação de cátions (principalmente cálcio e magnésio), água, argilas e raízes de plantas. Já a cimentação é a formação de agregados estáveis, de modo que as partículas primárias fiquem tão fortemente ligadas a ponto de não se dispersarem em água, devido à participação conjunta de agentes cimentantes como as argilas, devido à coesão, a matéria orgânica, coloides de ferro e alumínio e outras substâncias solúveis (GIOVANNINI; SEQUI, 1976).

Esta maior porcentagem de agregados estáveis na área irrigada esta diretamente relacionada com a dissolução do carbonato de cálcio nessa área (ver capítulo 2) que libera para o solo cálcio e carbonato o qual tem uma ligação com a agregação em solos calcários, pois segundo Six *et al.* (2004) a presença de cálcio ajuda a flocular partículas de argila e depois estabilizar o complexo de troca e os carbonatos podem criar pontes permanentes entre as partículas primárias e secundárias contribuindo para a estabilização de agregados (CLOUGH; SKJEMSTAD, 2000).

Existem várias maneiras de se explicar à agregação estável desse solo, uma delas é pelo do efeito condicionado pela presença de raízes, pela liberação de exsudatos que elevam os teores de material orgânico no solo, através da ciclagem bioquímica e, portanto, contribuem para a estabilização de agregados (MARTINS *et al.* 2002).

Segundo Silva *et al.* (2006), as raízes das plantas e os micélios de fungos criam uma rede que favorece a estabilidade dos agregados, os quais aumentam em número na presença de gramíneas, quando o solo não é perturbado.

Ciclos alternados de umedecimento e secagem, também atuam como agente de cimentação nos agregados, tornando-os mais estáveis, pois a expansão e a contração do solo com significativa quantidade de argila, devido ao ciclo mencionado acima, da origem a estrutura em blocos mais estável (HORN; SMUCKER, 2005).

Tabela 13. Valores médios para porcentagem de agregados estáveis.

Áreas	Estabilidade de agregados %			Média
	Profundidade (cm)			
	0-20	20-40	40-60	
Não irrigada	90,26 aA	89,17 aA	83,94 aA	87,79 b
Irigada	96,13 aA	94,04 aA	88,98 aA	93,05 a

Média seguida pela mesma letra minúscula na coluna, e mesma letra maiúscula na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para resistência à penetração (RP), não foi observada diferença significativa entre as áreas analisadas. Só correu diferença significativa na profundidade de 20-40 cm na área irrigada quando comparada com a profundidade de 0-20 cm na mesma área (Tabela 14).

Os valores encontrados nas duas área estão na faixa de 0,96 a 1,37 MPa. Segundo Benghough e Mullins, (1990), valores de RP entre 1,0 e 3,5 MPa podem restringir o crescimento e desenvolvimento das raízes. Esses valores encontrados validam os valores de densidade do solo encontrados nessas áreas, os quais não apresentaram diferença significativa.

Tabela 14. Valores médios de resistência a penetração na tensão de 10kPa.

Áreas	Resistência à penetração (MPa)		Média
	Profundidade (cm)		
	0-20	20-40	
Não irrigada	1,14 aA	1,13 aA	1,14 a
Irigada	1,37 aA	0,96 aB	1,16 a

Média seguida pela mesma letra minúscula na coluna, e mesma letra maiúscula na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.3.2 Porosidade do solo

A avaliação dos dados de macroporosidade e porosidade total evidenciam que não houve diferença significativa entre as duas áreas avaliadas (Tabela 15). Este fato está de acordo com a similaridade textural das duas áreas, uma vez que a origem do tamanho de poros relaciona-se ao tamanho de partículas. Observa-se que ocorreu interação significativa somente para microporosidade entre as áreas nas duas profundidades.

Apesar de não ter ocorrido uma diferença em relação à macroporosidade entre as duas áreas observa-se valores de macroporosidade nas mesmas abaixo do ideal. Segundo Baveret *et al.* (1972) a faixa de macroporos considerada ideal é de 10 a 16% para que não ocorra limitação da aeração do solo. Os valores de macroporosidade observados nas duas áreas, indicam a presença de compactação do solo causando a ocorrência de poros de tamanho e número reduzidos. Esta semelhança de possível compactação nas duas áreas esta relacionada ao pisoteio animal que ocorre nas mesmas, no qual causa aumento na densidade e uma redução da porosidade, principalmente, macroporosidade ou porosidade de aeração.

De fato, a redução do tamanho de poros é um dos primeiros indicativos da ocorrência do processo de compactação (SILVA, 2003). A estrutura é modificada, os macroagregados destruídos e os solos, com o tempo, podem desenvolver estrutura maciça (TAVARES FILHO *et al.* 1999), acarretando aumento de sua densidade e resistência mecânica a penetração (SOANE; VAN OUWERKERK, 1994).

A compactação causa redução dos macroporos com conseqüente aumento de microporos, reduzindo a porosidade total, porém em menor proporção que a macroporosidade (ARAÚJO, 2004).

Silva e Kay (1997) salientam que a microporosidade do solo é fortemente influenciada pela textura e teor de carbono orgânico e muito pouco influenciada pelo aumento da densidade do solo. Solos argilosos possuem altas quantidades de poros, mas esses poros são muitos pequenos (microporos), o que acarreta em solos de permeabilidade lenta, desacelerando a condução da água e gases no perfil.

A área irrigada apresentou uma microporosidade significativamente maior do que a área não irrigada, equivalente a 96% da porosidade total, composta de poros menores (poros com diâmetro menor que 30 μm). A ocorrência de microporos em

grandes proporções dificulta o movimento de água ao longo do perfil, diminuindo a drenagem interna do solo (CAVENAGE *et al.* 1999).

De acordo Leijet *al.* (2002) com o decorrer do tempo, o tamanho dos poros diminui devido ao preenchimento do espaço poroso com partículas, provocado pela compactação mecânica, ciclos de umedecimento e secagem e a atividade biológica do solo.

Wierzchoset *al.* (1997), estudando solos típicos do Vale do Ebro no norte da Espanha, sob diferentes regimes de uso do solo (irrigação por inundação por mais de 100 anos e de sequeiro), revelaram mudanças nos tamanhos dos poros e na distribuição dos mesmos com a irrigação. Eles observaram que os solos irrigados continham predominantemente mais microporos.

A porosidade total apresentou valores de $0,46 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ na área sem irrigação e de $0,49$ a $0,48 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ na área irrigada (Tabela 15). Nota-se que quase não ocorreu variação entre as duas áreas, podendo este fato estar relacionado à homogeneidade do teor de argila nas camadas avaliadas, pois o volume e o tamanho dos poros do solo são altamente dependentes da sua textura (DEDECEK, 2008).

Tabela 15. Valores médios de macroporosidade, microporosidade e porosidade total.

Áreas	Profundidade (cm)		Média
	0-20	20-40	
	Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)		
Não irrigada	0,04 aA	0,045 aA	0,043 a
Irigada	0,015 aA	0,015 aA	0,015 a
	Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)		
Não irrigada	0,420 bA	0,415 bA	0,420 b
Irigada	0,472 aA	0,470 aA	0,470 a
	Porosidade total ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)		
Não irrigada	0,460 aA	0,460 aA	0,460 a
Irigada	0,490 aA	0,482 aA	0,490 a

Média seguida pela mesma letra minúscula na coluna, e mesma letra maiúscula na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.3.3 Permeabilidade do solo ao ar

A permeabilidade do solo ao ar (K_{ar}) é um dos parâmetros físicos que governa o fluxo de gases no solo (SILVA *et al.* 2009).

A análise estatística dos dados de permeabilidade do solo ao ar, K_{ar} (Tabela 16), indicou haver diferenças estatísticas significativas para a variável K_{ar} entre as áreas (5% de probabilidade) e potenciais mátricos (1% de probabilidade) avaliados.

Tabela 16 – Valores médios de permeabilidade intrínseca do solo ao ar ($\log_{10} K_{ar}$, μm^2) nas duas áreas de estudo (irrigada e NIR: não irrigada) e para distintos potenciais mátricos da água no solo.

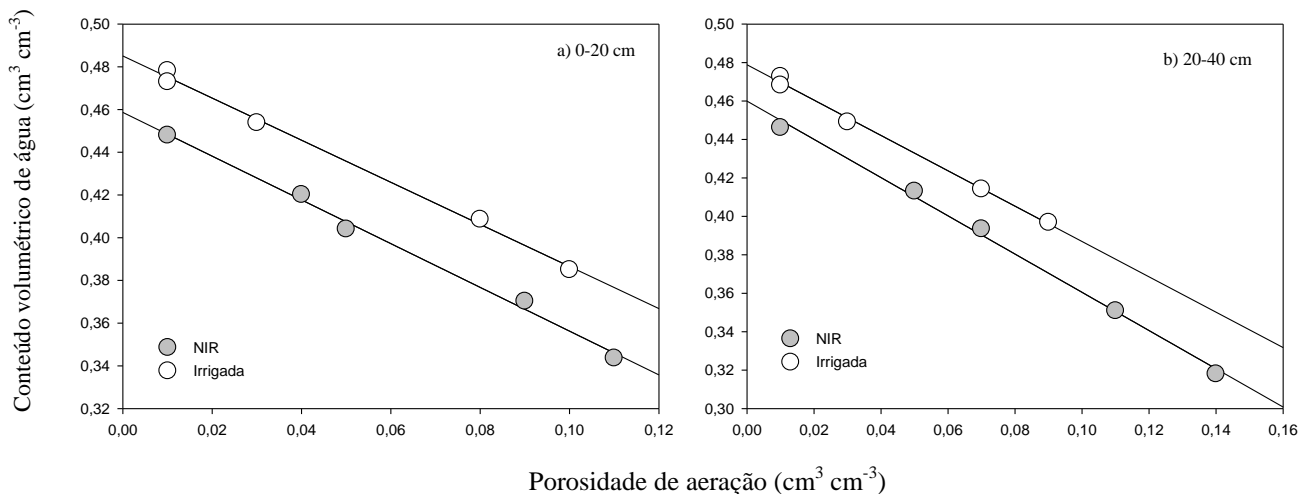
Áreas	Potenciais mátricos (kPa)					Média
	2	6	10	33	100	
NIR	0,4199 ac	1,0151 aB	1,0087 aB	1,2803 aA	1,4445 aA	1,0337 a
Irrigado	0,3434 aD	0,5507 bCD	0,6313 bBC	0,8531 bAB	1,0584 bA	0,68738 b

VN: vegetação natural. Média seguida pela mesma letra minúscula na coluna, e mesma letra maiúscula na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A permeabilidade do solo ao ar é fortemente influenciada pelo conteúdo de água no solo. Ela alcança seu valor máximo em solos secos e decresce à medida que o solo é umedecido até alcançar um valor de zero quando o solo está próximo ou na saturação (RODRIGUES, 2009). Existe, portanto uma relação dinâmica entre as fases líquidas e gasosas do solo. À medida que o volume de água aumenta, o volume de ar decresce, variando assim com o tempo suas quantidades.

Uma maneira de se entender melhor os valores de K_{ar} é através da porosidade de aeração (ε_{ar}) e a umidade do solo (θ), pois a redução da umidade aumenta o volume de poros ocupados por ar. Este efeito pode ser visto na Figura 29, onde se observa o aumento da ε_{ar} com a diminuição de θ , ou seja, com a diminuição do potencial mátrico da água no solo.

Figura 29. Valores médios de porosidade de aeração (ε_{ar}) em função do conteúdo volumétrico de água (θ), nos potenciais 2, 6, 10, 33 e 100 kPa, nas áreas não irrigada (NIR) e irrigada em duas profundidades.



A relação entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar e potencial mátrico da água no solo em condições sem irrigação e no solo sob irrigação, nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm, é apresentada na Figura 30. Verifica-se que no solo sem irrigação a relação entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar e potencial mátrico que melhor se adequou às duas variáveis foi à logarítmica, com r^2 de 99% e 95%, para as respectivas camadas. Para o solo em condição irrigada, a relação que melhor se adequou às variáveis estudadas foi à logarítmica e potencial, com r^2 de 96% e 97%, nas respectivas camadas.

Observa-se que em todas as curvas apresentam um comportamento similar, apresentando um aumento de permeabilidade do solo ao ar com o aumento do potencial mátrico de água do solo, visto que a K_{ar} é inversamente relacionada ao teor de água do solo. Portanto, o valor da permeabilidade se elevou devido à redução do teor de água da amostra de solo, fato que pode estar associado ao maior volume de poros e à formação de caminhos preferenciais para o fluxo de ar à medida que os poros de tamanho menores foram sendo progressivamente drenados (SILVA *et al.* 2009).

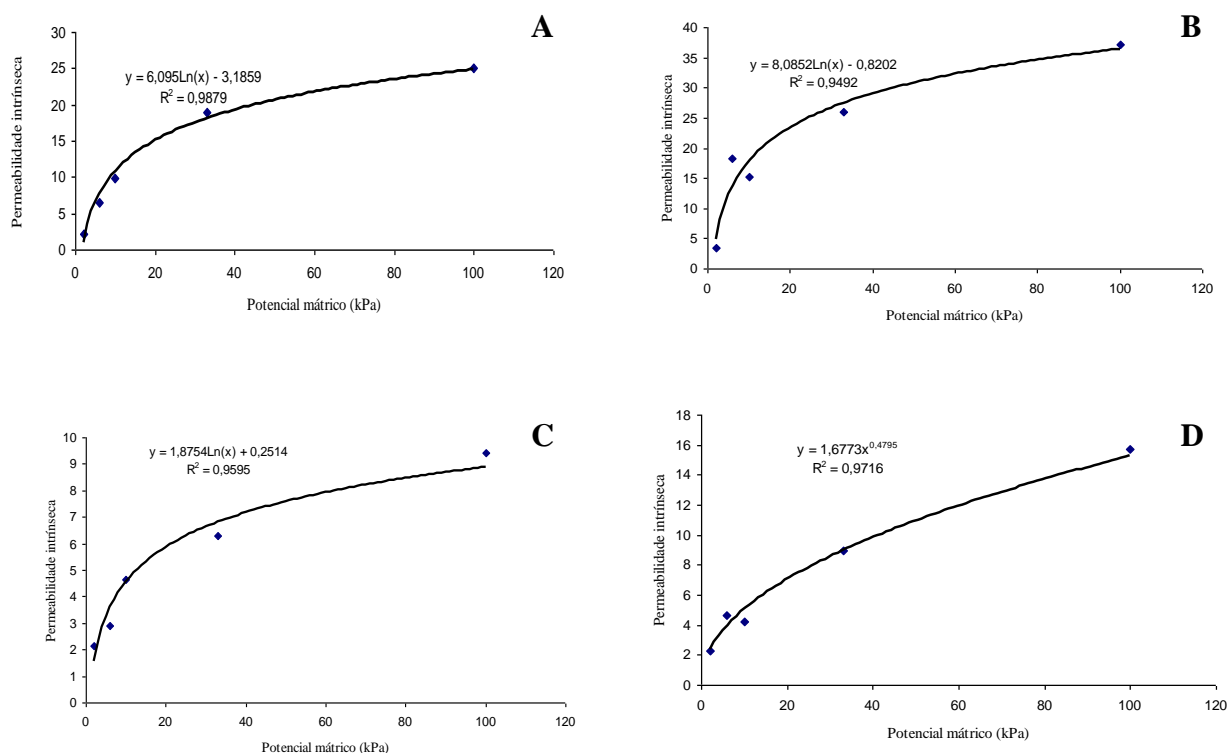


Figura 30 – Permeabilidade intrínseca do solo ao ar em função do potencial mátrico da água no solo não irrigado, nas camadas de 0-20 cm (A), 20-40 cm (B), e no solo sob irrigação, nas camadas de 0-20 cm (C), 20-40 cm (D).

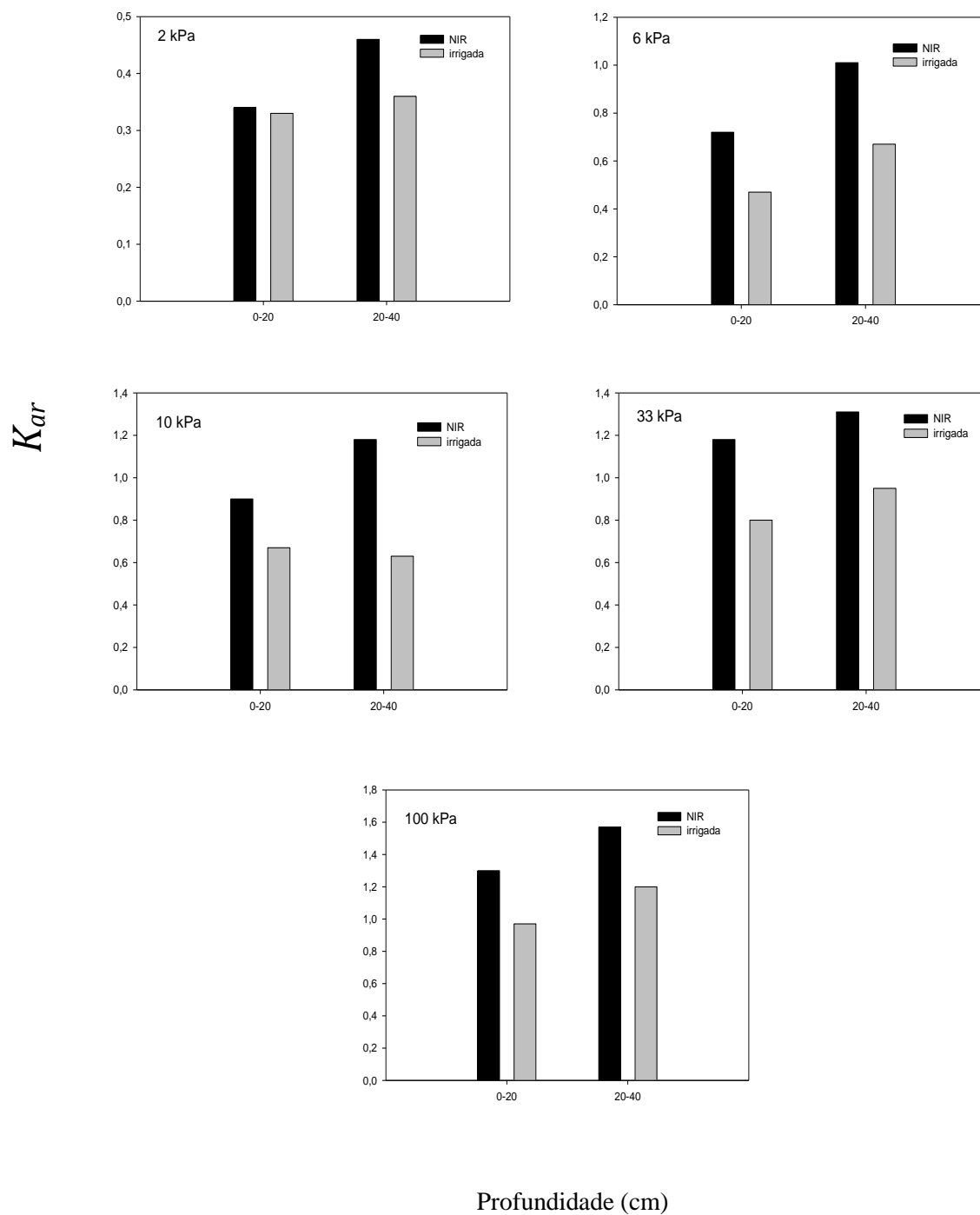
Segundo Araújo (2004) a permeabilidade depende diretamente do número, continuidade, tortuosidade e do quadrado do diâmetro dos poros de aeração, portanto é sensível a presença de macroporos.

Os valores médios de permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) ajustados por $\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}$, em todos os potenciais estão apresentados na Figura 31. Verifica-se que menores valores de K_{ar} ocorrem na área irrigada provavelmente devido à prevalência de microporos, fato que causa redução da permeabilidade uma vez que o tamanho dos poros determina se o solo possui alta ou baixa permeabilidade (RODRIGUES, 2009).

Alguns estudos têm definido a permeabilidade do solo ao ar como dependente da estrutura do solo (IVERSEN *et al.* 2001; TULI *et al.* 2005; SILVA *et al.* 2009) e influenciada pela porosidade total, distribuição e geometria do sistema poroso, conectividade e constrição (MOLDRUP *et al.* 2003; DORNER; HORN, 2009). Além disso, a K_{ar} é condicionada principalmente pelo tamanho e continuidade dos

macroporos, considerados até mesmo mais importantes do que a quantidade de poros na determinação do fluxo de ar (BALL et al., 1988).

Figura 31. Valores médios do log da permeabilidade ao ar (K_{ar}), das duas áreas estudadas (irrigada e não irrigada), nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.



4.3.4. Índices de continuidade de poros

O índice de continuidade de poros K_I é obtido pela razão entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar K_{ar} e a porosidade de aeração ε_{ar} . De acordo com Groenevelt *et al.* (1984), esse índice é uma técnica útil para avaliar se diferenças na permeabilidade intrínseca do solo ao ar são devidas somente às diferenças na porosidade de aeração, ou se podem ser função da geometria do espaço poroso preenchido com ar, como a distribuição do tamanho, tortuosidade e continuidade dos poros.

Segundo Groenevelt *et al.* (1984) solos com K_{ar} diferentes, porém com valores semelhantes de K_I , evidenciam distribuição semelhante de diâmetro e continuidade de poros. Altos valores de K_I indicam um sistema poroso com alta capacidade de transporte de ar devido ao alto grau de continuidade ou a baixa tortuosidade.

Tabela 17 - Índice de continuidade de poros (K_I) para a área não irrigada (NIR) e irrigada, nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm.

Áreas	Potencial mátrico (kPa)	Camadas (cm)	
		0-20	20-40
----- $\log_{10}K_I, \mu\text{m}^2$ -----			
NIR Irigada	-2	2,40	2,30
		2,40	2,40
NIR Irigada	-6	2,15	2,33
		2,33	2,53
NIR Irigada	-10	2,17	2,35
		2,15	2,11
NIR Irigada	-33	2,25	2,27
		1,91	2,12
NIR Irigada	-100	2,24	2,42
		1,97	2,27

Os resultados de K_I encontram-se na Tabela 17, onde se observa continuidade de poros semelhantes no intervalo de -2 a -10 kPa, para as duas áreas avaliadas. Nos

potenciais mátricos -33 e -100 kPa os valores de K_I são maiores na área de não irrigada, ou seja, são mais contínuos ou menos tortuosos em comparação a área irrigada.

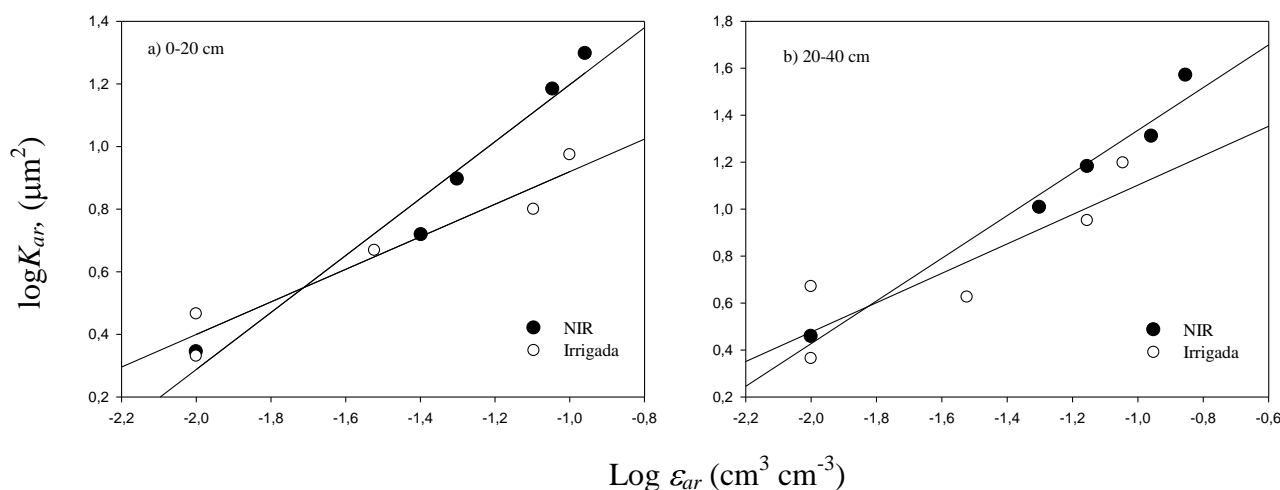
A razão para a área irrigada apresentar valores de K_I menores que a área não irrigada e conseqüentemente apresentar poros menos contínuos deve-se ao ciclo de umedecimento e secagem (HILLEL, 1998) provocado pela irrigação, que causa uma reconsolidação do solo e o rearranjo do espaço poroso aéreo do mesmo, tornando-o menos condutivo.

Esse aspecto encontrado na área irrigada de solo menos condutivo foi também evidenciado com relação à porosidade, onde se encontrou maior teor de microporos nessa área, conduzindo assim a uma menor permeabilidade desse solo ao ar.

A irrigação parece ter afetado assim a conectividade e a tortuosidade dos poros, podendo assim afetar, não só as taxas de fluxo, mas também condicionar a uma reestruturação do solo.

A relação exponencial entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) e porosidade de aeração (ε_{ar}) é apresentada na Figura 32. De maneira geral nas duas camadas (0-20 cm e 20-40 cm) e para as duas áreas, observa-se que as variáveis apresentaram uma correlação positiva. Verifica-se ainda que a área não irrigada apresentou maior percentual de poros contínuos nas duas profundidades com o aumento de ε_{ar} .

Figura 32 – Relação logarítmica entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) e porosidade de aeração (ε_{ar}) para o solo sem irrigação (NIR) e solo irrigado, nas camadas de 0-20 cm (a) e 20-40 cm (b).



A permeabilidade do solo ao ar (K_{ar}) também foi relacionada com a porosidade de aeração (ε_{ar}) pelo modelo exponencial $\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}$, para obtenção das constantes M e N (Tabela 18). De acordo com Rodrigues, (2009) a inclinação da reta (N) da relação entre $\log K_{ar}$ e $\log \varepsilon_{ar}$ é também um índice de continuidade de poros, que mostra a porcentagem de abertura dos caminhos de poros contínuos que estão disponíveis para o fluxo de ar com ao aumento da ε_{ar} .

Observa-se que maiores valores de N foram encontrados na área sem irrigação, evidenciando, mais uma vez, que nessa área os poros são mais contínuos e menos tortuosos. Em relação à porosidade bloqueada ao fluxo de gases (ε_b), o solo irrigado apresentou menor volume de poros bloqueados nas duas camadas quando comparado ao solo não irrigado (Tabela 18).

Tabela 18 – Parâmetros da regressão do modelo $\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}$ e porosidade bloqueada ε_b para o solo não irrigado e solo irrigado, nas camadas de 0-20 cm e 20-40 c.

Camadas cm	Não irrigada				% v v ⁻¹	Irigado			
	log M	N	r ²	ε_b		log M	N	r ²	ε_b
0-20	2,11	0,91	0,96	0,005	1,44	0,52	0,93	0,002	
20-40	2,46	0,91	0,97	0,003	1,73	0,63	0,78	0,002	

4.3.5. Análise de componentes principais (ACP)

A análise de componentes principais (ACP) foi realizada na matriz de dados constituída de 12 variáveis. A escolha do número de fatores pode levar em conta diferentes critérios, sendo um destes a seleção de autovalores superiores a 1 (VICINI, 2005). Deste modo, foram selecionados três componentes, cujos valores próprios foram superiores a 1. Estes três componentes possuem autovalores que correspondem a 63,09%, 21,15% e 15,76% da variância total, ou seja, explicam juntos 100% das variações das medias originais (Tabela 19).

Tabela 19- Autovalores e percentual da variância explicada por cada componente.

Número de componentes	Autovalores			
	Extração dos componentes principais			
	Autovalores	% da variância explicada	Autovalores acumulados	% da variância explicada acumulada
1	8,20	63,09	8,20	63,09
2	2,74	21,15	10,95	84,23
3	2,04	15,76	13,00	100,00

A correlação das variáveis analisadas com os componentes principais está apresentada na Tabela 20. Observa-se que as variáveis que mais contribuíram para o CP1 foram areia, argila, densidade de partículas, estabilidade de agregados, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, permeabilidade ao ar e índice de continuidade de poros. Para o CP2 foram densidade do solo, índice de continuidade de poros e matéria orgânica e já para o CP3 foi somente silte e resistência à penetração.

Tabela 20 - Correlação dos atributos analisados com os componentes principais (CP) obtidos a partir dos atributos analisados.

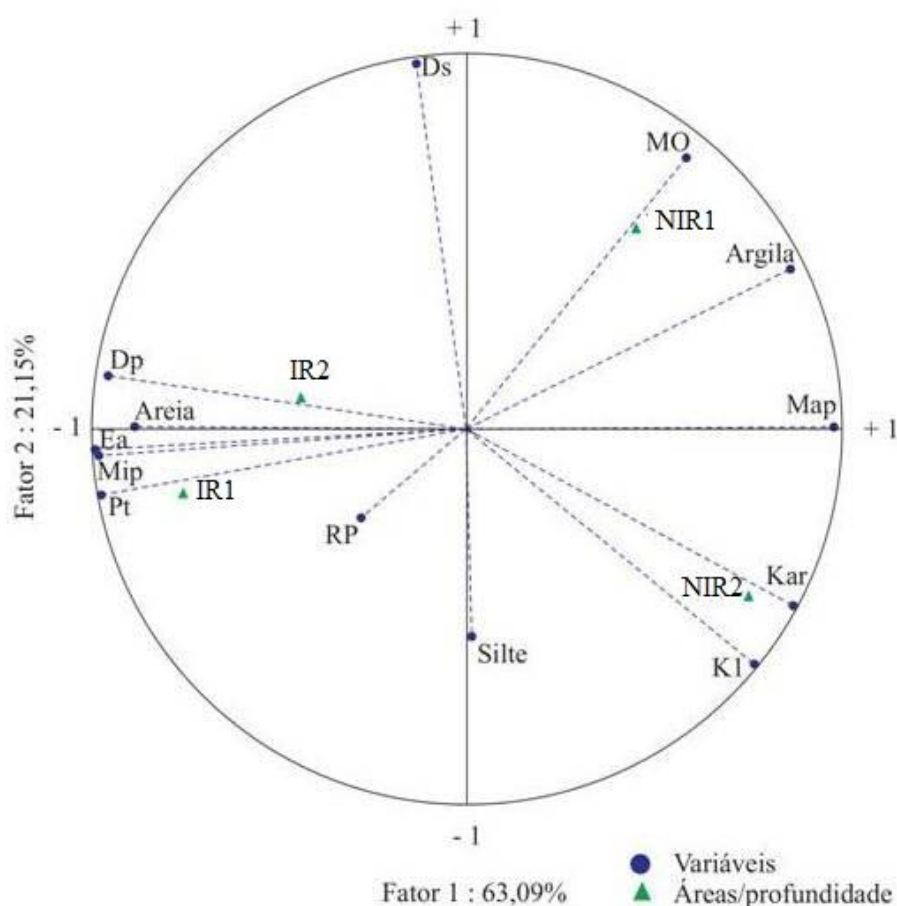
Variável	CP1	CP2	CP3
Areia	-0,89	0,00	0,44
Silte	0,01	-0,55	-0,83
Argila	0,87	0,43	0,21
Densidade de partículas	-0,95	0,14	-0,24
Densidade do solo	-0,13	0,99	0,02
Estabil.de agregado	-0,99	-0,5	0,07
Resist.à penetração	-0,28	-0,23	0,92
Porosidade Total	-0,98	-0,17	-0,07
Macroporosidade	0,98	0,00	0,18
Microporosidade	-0,98	-0,06	-0,17
Permeabilidade ao ar	0,87	-0,47	0,07
Continuidade de poros	0,77	-0,62	0,10
Matéria Orgânica	0,59	0,73	-0,31

Para evitar um gráfico em 3D que possui uma visualização mais complexa, e pelo fato de apenas duas variáveis, silte e resistência a penetração, estarem fortemente correlacionadas ao CP3, foram considerados apenas dois componentes principais (CP1 e CP2) para obtenção da figura de dispersão dos atributos físicos em 2D (Figura 33). Observando-se a Figura 33, constata-se que praticamente todas as variáveis encontram-se próximas ao círculo unitário, indicando assim boa contribuição aos componentes

principais, já os tratamentos encontram-se mais afastados do círculo unitário, principalmente a área irrigada na profundidade de 20-40 cm e a área irrigada na profundidade de 0-20 cm.

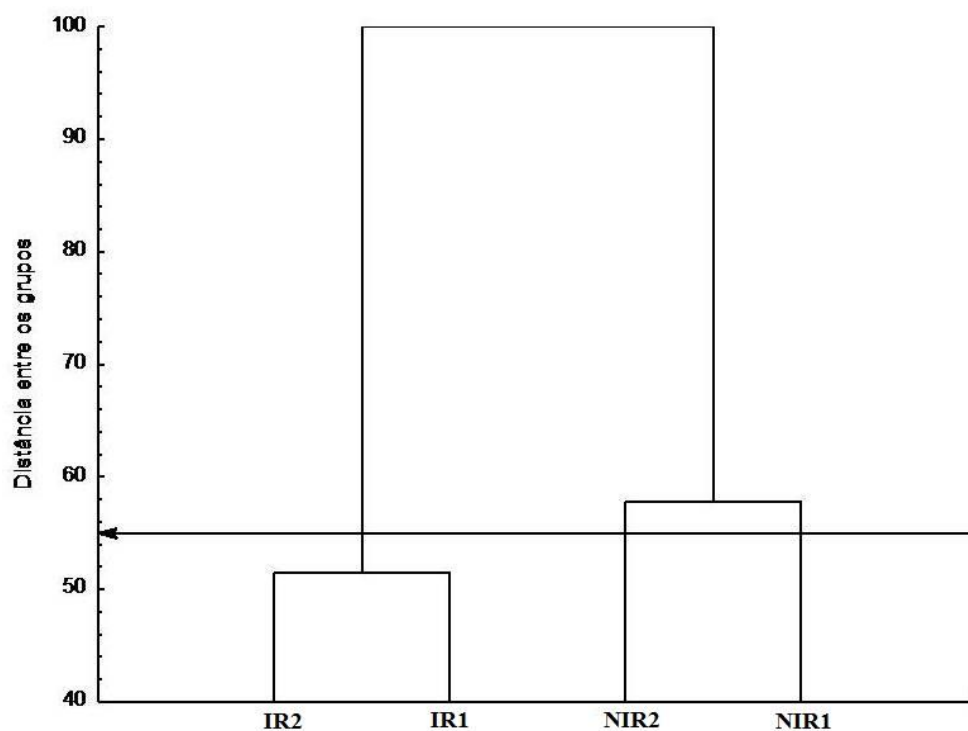
A área não irrigada na profundidade de 0-20 cm foi correlacionada mais fortemente com a variável matéria orgânica, argila e macroporosidade. Já na profundidade 20-40 cm essa área se correlacionou melhor com as variáveis macroporosidade, permeabilidade ao ar e índice de continuidade de poros. A área irrigada na profundidade de 0-20 cm teve influência da variável estabilidade de agregados, porosidade total, areia e microporosidade e na profundidade 20-40 cm se correlacionou fortemente com a densidade de partículas, areia e densidade do solo. Estes fatos corroboram com os resultados das análises citadas anteriormente.

Figura 33 - Dispersão dos atributos físicos em duas áreas (irrigada e não irrigada). EA = estabilidade de agregados; Ds = densidade do solo; DP = densidade de partículas; Micro = microporosidade; Macro = macroporosidade; PT = porosidade total; RP = resistência à penetração; Kar = permeabilidade do solo; K1= índice de continuidade poros. NIR1 e NIR2 corresponde a área não irrigada e I1 e I2 corresponde área irrigada cuja as profundidades são respectivamente 0-20 cm e 20-40 cm em todos.



Por meio do dendrograma, que apresenta a dissimilaridade entre os grupos formados a partir das análises dos atributos físicos do solo, pode-se observar a formação de dois grupos (Figura 34), um formado pela área irrigada nas duas profundidades e o outro formado pela área não irrigada nas duas profundidades. Fica evidente a distinção entre os tratamentos, assim como a similaridade entre as profundidades, corroborando com os resultados das análises e com o círculo unitário.

Figura 34 – Dissimilaridade entre os grupos estabelecida por distância euclidiana a partir dos atributos argila, areia, silte, densidade do solo; densidade de partículas, estabilidade de agregados, resistência à penetração, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, permeabilidade ao ar e índice de continuidade de poros. IR1 e IR2 corresponde a área irrigada e NIR1 e NIR2 a área não irrigada, ambos, respectivamente as profundidades de 0-20 e 20-40 cm.



4.4 CONCLUSÕES

Os 23 anos de irrigação no solo na área de pivô e seus consequentes ciclos de umedecimento e secagem foram suficientes para causar uma melhor estabilização dos agregados do solo situado na área irrigada, como também um aumento na quantidade de microporos nessa área.

Com base na determinação da permeabilidade do solo ao ar (K_{ar}) e dos índices de continuidade de poros (KI e N), foi possível verificar que a irrigação modificou o solo, diminuindo sua permeabilidade e resultando na formação de poros menos contínuos e mais tortuosos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHUJA, L.R.; NANEY, J.W.; GREEN, R.E.; NIELSEN, D.R. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **SoilSci. Soc. Am. J.**, 48: 699-702, 1984.
- ARAÚJO, A.G. **Estimativa e classificação da compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas através da modelagem nebulosa**. 2004. 224 p. Tese (Doutorado em Sistemas Digitais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- BALL, B.C.; O’SULLIVAN, M.F. & HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. **J. Soil Sci.**, 39:327-339, 1988.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Soil Physics**. 4° ed. New York: John Wiley, 1972. 428 p.
- BENGHOUGH, A.G. & MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. **J. SoilSci.**, 41:341-358, 1990.
- BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. 6 ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983. 647p.
- BRANFORD, J.M. The penetration resistance in a soil with well-defined structural units. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 44:601-606, 1980.
- BULLINGER-WEBER, G.; LE BAYON, R.; GUENAT, C.; GOBAT, J. Influence of some physicochemical and biological parameters on soil structure formation in alluvial soils. **European Journal of Soil Biology** 43 (2007) 57 - 70.
- CAVENAGE, A. et al. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-escuro sob diferentes culturas. **Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1535-1545, nov./dez. 2009.
- COELHO, R.D. **Análises físicas de solo para projetos e manejo de sistemas de irrigação**. In: MAQUINARIA agrícola. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, p.4-5. 1992.
- CLOUGH, A., SKJEMSTAD, J.O., 2000. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate. **Aust. J. Soil Res.** 38, 1005–1016.
- DEDECEK, R. A. Meio físico para o crescimento de *Pinus*: limitações e manejo. In:

SHIMIZU, J. Y. **Pínus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. p.75-109.

DNOCS. DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS.

Perímetro irrigado Jaguaribe Apodi. Disponível em:

<http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/ce/jaguaribe_apodi.html>. Acesso em: 24 junho de 2012.

DORNER, J.; HORN, R. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 225-232, Mar. 2009.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 212p. 1997.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação do Solo**. Rio de Janeiro 2ed, 306p. 2006.

FEITOSA, E. C. **A exploração do aquífero Açu na região de Mossoró – RN**: Caracterização da situação atual e perspectiva de atendimento da demanda futura (Programa de água subterrânea para a região nordeste – Série Hidrogeologia: Pesquisa e Desenvolvimento, 1). Brasília: CPRM, 1996. 44p, 1996

GAVANDE, S. A. **Física de suelos**: principios y aplicaciones. México: Editorial Limusa. 1976.

GIOVANNINI, G. AND P. SEQUI (1976): “Iron and Aluminium as cementing substrates of soil aggregates. II. Changes in stability of soil aggregates following extraction of iron and Al by acetylacetone in a non-polar solvent”. **J. Soil Sci.**, v. 27, 148-153.

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

HILLEL, D. **Environmental soil physical**. New York: Academic Press, 1998. 770 p.

HORN, R.; SMUERKER, A. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. **Soil & Tillage Research** 82 (2005) 5–14.

IVERSEN, B. V. et al. In situ, on-site and laboratory measurements of soil air permeability: boundary conditions and measurement scale. **Soil Science**, v. 166, n.2, p. 97-106, feb. 2001.

KIRKHAM, D. 1946. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 11:93-99.

LEIJ, F. J.; GHEZZEHEI, T. A.; OR, D. Analytical Models for Soil Pore-Size Distribution After Tillage. **Soil Science Society of America Journal**.v.66, p1104-1114, 2002.

MARTINS, S. G. et al. Avaliação de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico sob diferentes povoamentos florestais. **Cerne**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 32- 42, jan./jun. 2002.

MENDONÇA, E. S. & MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV. 2005. 107p.

MORAIS, L.F.S .; FILHO, F.C.R. ; CORDEIRO, W.; FIGUEIREDO,M.C.B.; ROSA, M.F. Análise das águas subterrâneas nos municípios do Médio e Baixo Jaguaribe: mapeamento e estimativa da disponibilidade atual. **Revista Ciência Agronômica**, v. 36, n. 1, p. 34-43, 2005.

NEVES, C.M.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; CARDOSO, E.L. MACEDO, R.L.G.; FERREIRA, M.M.; SOUZA, F.S. Atributos indicadores da qualidade do solo em sistema agrosilvopastoril no noroeste do estado de Minas Gerais. **Sci. Forestalis**, 74: 45-53, jun. 2007.

NEWMAN, A.C.D., THOMASSON, A.J., 1979. Rothamsted studies of soil structure. III. Pore size distributions and shrinkage processes. **J. Soil Sci.** 30, 415–439.

OLIVEIRA, J. B. DE, JACOMINE, P. K. T., CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil. Guia auxiliar para seu reconhecimento**.2.ed. Jaboticabal: FUNEP/UNESP. 1992. 201p.

PAGLIAI, M., LA MARCA, M., LUCAMANTE, G., 1987. Changes in soil porosity in remolded soils treated with poultry manure. **Soil Science** 144, 128–140.

RAJARAM, G., ERBACH, D.C., 1999. Effect of wetting and drying on soil physical properties.**J.Terramech.** 36, 39–49.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ci. Amb.**, 27:29-48, 2003.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. **Propriedades físicas do solo**. 2006. Disponível em: http://w3.ufsm.br/msrs/downloads/Apresentacoes%20aulas%20palestras/Propriedades%20fisicas%20do%20solo%20-%20Reichert_Reinert.pdf. Acesso em: 14 de maio de 2012.

RODRIGUES, S. **Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob plantio direto e preparo convencional**. 2009. 66 p. Dissertação (Mestrado)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

RODRIGUES, S.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B.; ROSA, J.A. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, 35: 105-114, 2011.

SARTORI, G., FERRARI, G.A., PAGLIAI, M., 1985. Changes in soil porosity and surface shrinkage in a remolded, saline clay soil treated with compost. **Soil Science** 139, 523–530.

SCHOENEBERGER, P.J., WYSOCKI, D.A., BENHAM, E.C., AND BRODERSON, W.D. (editors), 2002. Field book for describing and sampling soils, Version 2.0. Natural Resources Conservation Service, **National Soil Survey Center**, Lincoln, NE.

SCHJØNNING, P.; MUNKHOLM, L.J.; MOLDRUP, P. & JACOBSEN, O.H. Modelling soil pore characteristics from measurements of air exchange: The long term effects of fertilization and crop rotation. **Europ. J. SoilSci.**, 53:331-339, 2002.

SILVA, A.P.; LEÃO, T.P.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 33: 1535-1545, 2009.

SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V. & CARVALHO, F.G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **R. Bras. Eng. Agric. Amb.**, 10:579-585, 2006.

SILVA, A.P. & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **SoilSci. Soc. Am. J.**, 61:877-883, 1997.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. Santa Maria: UFSM, 2003. 171p. Tese Doutorado.

SILVEIRA, L.R.; BRITO, A.S.; MOTA, J.C.A.; MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L. Sistema de aquisição de dados para equipamento de medida da permeabilidade intrínseca do solo ao ar. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 35: 429-436, 2011.

SIX, J., BOSSUYT, H., DEGRYZE, S., DENEFF, K., 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil Tillage Res.** 79, 7–31.

SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction in crop production. Netherlands: Elsevier, 1994. 21p. study. **J. Soil Sci.**, 41:563-572, 1990.

Soil Survey Staff, 1993. **Soil Survey Manual**. U.S. Department of Agriculture, 437 pp.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do perfil cultural para a avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.111-119, 1999.

TELFAIR, D., GARDNER, M.R., MIARS, D., 1957. The restoration of a structurally degenerated soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 21, 131–134.

TULI, A. et al. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 1361-1371, set./out. 2005.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. Santa Maria: UFSM, 2005. 215 p. (Monografia de Especialização).

WIERZCHOS, J.; GARCIA GONZALES, M.T. & BOIXADERA. Structure and structure- related characteristics of dryland and loh-term irrigated Xerocherept soils. **Arid Soil Res. Rechabil.** 11: 127-137, 1997.

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v.19.p.1467-1476, 1988.

ANEXOS**ANEXOS I****DESCRIÇÃO GERAL DOS PERFIS DE SOLO DA CHAPADA DO APODI-CE****A. DESCRIÇÃO GERAL****PERFIL 1** (área não irrigada)

DATA – 26.09.11

CLASSIFICAÇÃO – Cambissolo Háptico Carbonático saprolítico

UNIDADE DE MAPEAMENTO

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Chapada do Apodi (CE), S 05° 12' 27,5" W 038° 02' 30,7"

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Descrito e coletado em trincheira, sob vegetação nativa

ALTITUDE – 165 m

LITOLOGIA – Calcário

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Formação Jandaíra

CRONOLOGIA – Cretáceo

MATERIAL ORIGINÁRIO – Calcário Jandaíra

PEDREGOSIDADE – Não pedregosa

ROCHOSIDADE – Não rochosa

RELEVO LOCAL – Plano

RELEVO REGIONAL – Plano

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Boa

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Caatinga

USO ATUAL –

CLIMA – BSw'h', da classificação de Koppen.

DESCRITO E COLETADO POR – Ricardo Espíndola Romero / Tiago Osório Ferreira

B. DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA**Ac** : 0-17cm; bruno - escuro (7,5YR 3/4, úmido); moderada pequena a média blocos subangulares; ligeiramente duro e muito friável, muito plástico e pegajoso; transição plana e clara.**Bic 1** : 17-31cm; bruno - escuro (7,5YR 3/3, úmido); moderada muito pequena a média blocos subangulares; macio e muito friável, muito plástico e pegajoso; transição plana e clara.**Bic 2** : 31-44cm; bruno - escuro (7,5YR 3/3, úmido); moderada pequena a grande blocos subangulares; ligeiramente duro e muito friável, muito plástico e pegajoso; transição plana e abrupta.**Bic 3** : 44-48cm; bruno - escuro (7,5YR 3/4, úmido); moderada pequena a média blocos subangulares; ligeiramente duro e muito friável, muito plástico e pegajoso transição ondulada e abrupta;**Ccrk** : 48-82cm, concreções carbonáticas (cor esbranquiçada); transição plana e clara.

Ccrk/R : 82-119cm; amarelo- claro- acinzentado (2,5Y 7/4, úmido); mosqueado bruno-forte e amarelo (7,5 YR 4/6 e 2,5Y 7/8); friável; transição plana e gradual.

Crkc 1: 119-141; amarelo- claro- acinzentado (2,5Y 7/4, úmido); mosqueado brunomuito claro- acinzentado e amarelo (10YR 8/2 e 2,5Y 7/8); friável, plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual.

Crkc 2 : 141-177+; branco (2,5Y 8/1, úmido); mosqueado amarelo e amarelo- claro- acinzentado (2,5Y 7/8 e 2,5Y 7/4); silte; plástico e ligeiramente pegajoso.

RAÍZES: Raras finas e médias no horizonte Ac; poucas finas e raras finas e médias no horizonte Bc 1; raras médias no horizonte Bc 2; raras finas no horizonte Bc 3; raras finas no horizonte Ccrk.

OBSERVAÇÕES:

Horizonte Bic 3: parte inferior deste horizonte varia entre 48 a 51 cm.

Horizontes Ccrk: não foi realizada a consistência seca e úmida devido o excesso de concreções.

Horizonte Bic 3: concreções ferruginosas de maior tamanho e presença de chumbinho de caça.

Horizonte Ccrk presença de concreções carbonáticas. O horizonte apresenta cor esbranquiçada.

Horizonte Ccrk/R: mosqueados comuns, grandes e proeminentes.

Horizonte Crkc 1 e Crkc 2 : presença de concreções ferruginosas.

A. DESCRIÇÃO GERAL

PERFIL 2 (área irrigada)

DATA – 26.09.11

CLASSIFICAÇÃO – Chernossolo Háplico carbonático saprolítico

UNIDADE DE MAPEAMENTO –

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Chapada do Apodi (CE), S 05° 12' 26,3" W 038° 02' 30,0"

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Descrito e coletado em trincheira

ALTITUDE – 165 m

LITOLOGIA – Calcário

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Formação Jandaíra

CRONOLOGIA – Cretáceo

MATERIAL ORIGINÁRIO – Calcário Jandaíra

PEDREGOSIDADE – Não pedregosa

ROCHOSIDADE – Não rochosa

RELEVO LOCAL – Plano

RELEVO REGIONAL – Plano

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Moderada

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Caatinga

USO ATUAL – pastagem (capim tifton)

CLIMA – BSw'h', da classificação de Koppen.

DESCRITO E COLETADO POR – Ricardo Espíndola Romero / Tiago Osório Ferreira

B. DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Apc: 0-18 cm; bruno- escuro (7,5YR 3/3, úmido); forte média granular a blocos subangulares; ligeiramente duro e friável, muito plástico e pegajoso; transição plana e gradual.

Bic 1: 18-33 cm; bruno- escuro (7,5 YR 3/4, úmido); moderada média blocos subangulares; cerosidade pouca e fraca; ligeiramente duro e muito friável, muito plástico e muito pegajoso; transição ondulada e clara.

Bic 2: 33-55 cm; bruno- escuro (7,5 YR 3/4, úmido); moderada grande média e blocos subangulares; cerosidade comum fraca a moderada; ligeiramente duro e muito friável, muito plástico e pegajoso; transição plana e abrupta.

Ccrk 1: 55-132 cm; cor esbranquiçada; transição plana e gradual;

Ccrk 2: 132-174+ cm; bruno- amarelado- claro (2,5 Y 6/4, úmido); mosqueado bruno muito claro- acinzentado (10 YR 8/2, úmido), abundante, grande e proeminente.

RAÍZES: muitas médias e raras finas no horizonte Apc; comuns média e raras finas no horizonte Bic 1; poucas médias e raras finas no horizonte Bic 2; raras finas no horizonte Ccrk 1; raras finas no horizonte Ccrk 2.

ANEXO II
FOTOS DOS PERFIS

PERFIL 1 – NÃO IRRIGADO



Cambissolo Háplico Carbonático saprolítico

PERFIL 2 - IRRIGADO



Chernossolo Háplico carbonático saprolítico