



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA  
DOUTORADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

ISABEL GIOVANNA COSTA E MELO

**EFEITOS DO CARVÃO VEGETAL NO SOLO E SOBRE CULTIVOS DE FEIJÃO-  
CAUPI EM AMBIENTE PROTEGIDO**

MOSSORÓ

2016

ISABEL GIOVANNA COSTA E MELO

**EFEITOS DO CARVÃO VEGETAL NO SOLO E SOBRE CULTIVOS DE FEIJÃO-  
CAUPI EM AMBIENTE PROTEGIDO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de **Doutor em Manejo de Solo e Água.**

Linha de Pesquisa: Manejo do Solo e da Água no Ambiente Agrícola

Orientador: D. Sc. Neyton de Oliveira Miranda

MOSSORÓ

2016

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

M528e Melo, Isabel Giovanna Costa e.  
Efeitos do carvão vegetal no solo e sobre  
cultivos de feijão-caupi em ambiente protegido /  
Isabel Giovanna Costa e Melo. - 2016.  
97 f. : il.

Orientador: Neyton de Oliveira Miranda.  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural  
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em  
Manejo de Solo e Água, 2016.

1. Feijão-caupi. 2. Carvão vegetal. 3. Retenção  
de água. 4. Fertilidade do solo. I. Miranda,  
Neyton de Oliveira, orient. II. Título.

ISABEL GIOVANNA COSTA E MELO

**EFEITOS DO CARVÃO VEGETAL NO SOLO E SOBRE CULTIVOS DE FEIJÃO-  
CAUPI EM AMBIENTE PROTEGIDO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutor em Manejo de Solo e Água.

Defendida em: 29 / 07 / 2016 .

**BANCA EXAMINADORA**



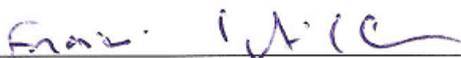
Neyton de Oliveira Miranda, Prof. Dr. (UFERSA)  
Presidente



Lindomar Maria da Silveira, Profa. Dra. (UFERSA)  
Membro Examinador



Alexandre Santos Pimenta, Prof. Dr. (UFRN, UAECIA)  
Membro Examinador



Francisco de Assis de Oliveira, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador



Renato Dantas Alencar, Prof. Dr. (IFRN, Campus Apodi)  
Membro Examinador

## **Ofereço**

*Ao meu pai João de Melo (em memória) pela vida de plena dedicação aos filhos, nos deixando valiosos ensinamentos, que fortaleceram nosso caráter e nos permitiram conquistar lugares de honra e realização, como este.*

*Ao nosso Deus todo poderoso, por permitir cada momento da vida.*

*Á toda minha família, em especial, minha mãe Margarida, minha filha Lara e meu esposo Glêidson, que estiveram ao meu lado e que, decisivamente, compartilharam e me reergueram em cada momento desafiador.*

**Dedico**

## AGRADECIMENTOS

Neste momento, no encerramento deste ciclo da minha vida, eu tenho por convicção que gratidão seja o sentimento humano mais afetivo e significativo. Esta caminhada foi repleta de mudanças, enriquecedoras e desafiadoras, foi quando alcancei minhas maiores conquistas, pessoais e profissionais, e foi compartilhada por muitas pessoas especiais que tornaram o caminho mais leve e mais feliz. Exponho aqui minha eterna gratidão a aqueles que expressivamente contribuíram para que esta batalha fosse vencida:

- Ao meu **Deus**, pelo dom precioso da vida, por me guiar diariamente, me concedendo saúde e força necessária para sempre seguir em frente; pela fé que tenho;
- À **UFERSA**, por toda minha formação profissional, da graduação a este doutorado;
- Ao **PPGMSA**, em nome de seus mestres e funcionários, por tudo que pude aprender e vivenciar nesses anos;
- Ao professor, orientador e amigo, **Neyton Miranda**, pelo privilégio de suas orientações ao longo de toda minha formação profissional, pessoa de admirável competência e generosidade. Obrigada por todos os ensinamentos transmitidos, pessoais e profissionais, pelo apoio e confiança que sempre foi me dada;
- À banca examinadora deste trabalho, **Alexandre Pimenta, Lindomar Maria, Francisco de Assis e Renato Alencar**, pelas valiosas contribuições e sugestões;
- Aos colegas do PPGMSA, em especial **Mairana**, pela amizade, valiosas trocas de experiências e pelo convívio tão enriquecedor;
- Aos colegas de pesquisa **Mickael, Juliana, Flaviano, Ramualysson, Levi, Emanuel** e a grande amiga **Maria Eugênia**, pela inestimável e fundamental ajuda nas coletas de campo e análises laboratoriais, além do convívio e amizade;
- Aos meus pais **João de Melo** (em memória) e **Margarida** que sempre primaram pela minha educação, priorizando a vida nos preceitos de Cristo, pelo exemplo de honestidade, amor e dedicação à família, que me conduziram aos melhores caminhos;
- À minha filha amada **Lara**, herança de Deus na minha vida, que nasceu durante esta trajetória, fonte infinita de inspiração, amor, ternura e alegria;
- Aos meus irmãos, **Lucas e Tiago**, que acompanhei crescerem como profissionais e seres humanos, e se tornarem referências na minha vida; e aos meus sobrinhos, **Luan e João**, por serem nossas fontes de alegria e paz, tornando as batalhas mais suaves;
- Ao meu esposo **Glêidson** pelo amor, compreensão e paciência, que foram imprescindíveis durante todo o doutorado, por estar ao meu lado e me incentivar incansavelmente. E a toda a sua família, que também é parte da minha família, em nome de **Dona Salete**, pelo convívio e acolhida;
- Á toda minha família, em nome da minha tia **Márcia**, que esteve sempre presente, ajudando-me no que era possível para que eu pudesse me dedicar a esta tese;
- A todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta tese.

Muito obrigada!

*"Mas os que esperam no SENHOR renovam as suas forças, sobem com asas como águias, correm e não se cansam, caminham e não se fatigam."*

**Isaías 40:31**

## RESUMO

Melo, I. G. C. e. Efeitos do carvão vegetal no solo e sobre cultivos de feijão-caupi em ambiente protegido. 2016. 97f. Mossoró-RN: UFERSA/PGMSA. Tese de Doutorado.

O aumento da população mundial tem levado ao incremento da demanda por água e alimentos, gerando, com isso, maior pressão sobre o solo e a água, e conseqüentemente sua degradação e escassez. O uso de carvão vegetal na agricultura surge como uma técnica sustentável, cuja contribuição para a melhoria da qualidade do solo e da produtividade das culturas tem sido apontada por diversos estudos. Portanto, foram desenvolvidos dois experimentos visando avaliar a influência da aplicação do carvão vegetal sobre características químicas e físicas do solo e sobre a produtividade de dois cultivos sucessivos de feijão-caupi. Os experimentos foram conduzidos em vasos, entre março de 2013 e março de 2014, em casa de vegetação da UFERSA, Mossoró-RN. O delineamento estatístico foi o de blocos ao acaso em esquema fatorial 4x5, tendo sido testadas quatro doses de carvão vegetal (0; 3,5; 7 e 10,5 t ha<sup>-1</sup>) em cinco tipos de solo [Argissolo (AS), Cambissolo (CS), Latossolo (LS), Neossolo Flúvico (NFS) e Neossolo Quartzarênico (NQS)], com 5 repetições. O carvão vegetal foi produzido a partir de resíduos da poda de cajueiros. As variáveis avaliadas foram características físicas do solo (capacidade de retenção de água e densidade do solo), características químicas do solo [pH, matéria orgânica (MOS), P, K, Na, Ca, Mg, percentual de sódio trocável (PST) e soma de bases (SB)], características de crescimento inicial das plântulas (porcentagem de emergência de plântulas, altura das plântulas, massa seca da parte aérea) e componentes de produção do feijão-caupi (número de grãos por vagem, comprimento médio de vagens, massa de 100 grãos e produtividade por vaso de grãos secos no primeiro cultivo e de grãos verdes no segundo). Os dados foram submetidos à análise de variância e análise de regressão ou teste de Tukey, conforme os efeitos significativos encontrados. Com poucas exceções, o comportamento das variáveis em função da dose de carvão vegetal aplicada diferiu conforme o tipo de solo. A aplicação de carvão vegetal promoveu aumento linear de 14% na capacidade de retenção de água para a maior dose, em relação à dose zero, independentemente do tipo de solo. Além disso, promoveu redução na densidade do solo apenas no CS e LS. As doses de carvão vegetal promoveram no solo CS os maiores aumentos lineares nos valores das variáveis de crescimento inicial do feijão-caupi. As doses de carvão vegetal promoveram aumentos lineares nas variáveis de crescimento inicial na maioria dos solos. Independente da dose de carvão vegetal, o solo NFS apresentou os maiores valores de número de grãos por vagem (NGV), comprimento de vagens (CMV), massa de cem grãos (P100G) e produtividade (PROD) do feijão-caupi nos dois cultivos. As doses de carvão vegetal promoveram aumentos lineares nos valores dos componentes de produção do feijão-caupi na maioria dos solos nos dois cultivos, com poucos efeitos negativos no segundo cultivo. Independente da dose de carvão vegetal, os maiores valores de P, Na, K, Ca, Mg e SB foram obtidos no NFS; de pH e Na no AS e de MOS no CS. Enquanto que o NQS apresentou os menores teores de MOS, P, K, Na e os maiores de PST. As doses de carvão vegetal exerceram efeito positivo apenas sobre pH, MOS, P e PST, principalmente nos solos NFS e CS, entretanto, em geral, não apresentou efeitos visíveis sobre características químicas como K, Na, Ca e SB, na maioria dos solos. Efeitos negativos do aumento na dose de carvão vegetal foram observados para SB, P, Na, Ca, pH, PST, Na e K nos solos NFS, LS e CS.

**Palavras-chave:** *Vigna unguiculata* L. Biocarvão. Fertilidade do solo. Retenção de água.

## ABSTRACT

The increase in world population has led to increased demand for water and food, causing thereby greater pressure on agricultural land, and therefore its degradation and scarcity. The use of biochar in agriculture emerges as a sustainable technique, which contribution to the improvement of soil quality and crop productivity has already been highlighted in several studies. Therefore, two experiments were conducted in order to evaluate the influence of biochar application on soil chemical and physical properties and on the yield of two successive crops of cowpea. The trials were conducted in pots, in the period from March 2013 to March 2014, in a greenhouse at UFERSA, Mossoro, RN, Brazil. The experimental design was that of randomized blocks in a 4x5 factorial scheme, being tested four biochar doses (0, 3.5, 7 and 10.5 t ha<sup>-1</sup>) and five types of soil [Argisol (AS), Cambisol (CS), Oxisol (LS), Fluvic (NFS) and Quartzipsamment (NQS)] with five replications. Biochar was produced from wood resulting from the pruning of cashew trees. Variables analyzed were soil physical properties (water holding capacity and soil density), soil chemical properties [pH, soil organic matter (SOM), P, K, Na, Ca, Mg, exchangeable sodium percentage (ESP) and sum of bases (SB)], characteristics of initial growth of the seedlings (emergence percentage, seedling height and shoot dry mass per seedling) and yield components of cowpea (number of grains per pod (NGP), average length of pods (LP), hundred grain weight (HGW) and grain yield (GY)). Data were submitted to analysis of variance, besides analysis of regression or Tukey test, depending of the effects being considered. With few exceptions, the behavior of the variables was different according to the soil type. Addition of biochar provided a linear increase of 14% in the water holding capacity for the higher dose in relation to the control. Reduction in soil density was provided by biochar application only in the CS and LS. Biochar doses provided in the CS the largest linear increases in values of variables of initial growth of cowpea. Regardless of biochar dose, the NFS soil showed larger values of NGP, LP, HGW and GY of cowpea in both crops. Biochar doses provided linear increases in values of the components of yield of cowpea in both crops, with few negative effects in the second crop. Regardless of biochar dose, the largest values of P, Na, K, Ca, Mg e SB were obtained in the NFS; of pH and Na in the AS and of SOM in the CS, while NQS showed the lowest values of SOM, P, K, Na, and the largest values of ESP. Biochar doses of exerted a positive effect only on pH, SOM, P and ESP, mainly in the soils NFS and CS, however, generally, the doses did not presented consistent effects on chemical characteristics like K, Na, Ca and SB, in most soils. Negative effects of the increase in biochar dose were observed for SB, P, Na, Ca, pH, ESP, Na and K in the soils NFS, LS and CS.

**Keywords:** *Vigna unguiculata* L. Biochar. Soil Fertility. Soil water retention

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características químicas e físicas dos solos utilizados nos experimentos em mistura com carvão vegetal. Mossoró-RN, 2013. ....	35
Tabela 2 – Caracterização do carvão vegetal utilizado no experimento, obtido de resíduo de poda de cajueiro. Mossoró-RN, 2013. ....	37
Tabela 3 – Resumo da análise de variância para capacidade de retenção de água (CRA) e densidade do solo (Ds) em função de doses de carvão vegetal aplicadas em cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013. ....	45
Tabela 4 – Valores médios de capacidade de retenção de água nos vasos (CRA) após a aplicação de carvão vegetal em diferentes tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013. ....	46
Tabela 5 – Resumo da análise de variância para porcentagem de emergência de plântula (TE), altura de plântula (Altura) e Massa seca da parte aérea (MSP) de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013. ....	49
Tabela 6 – Resumo da análise de variância para número de grãos por vagem (NGV), comprimento médio da vagem (CMV), massa de 100 grãos (P100G) e produtividade de grãos (PROD) em dois cultivos (1º e 2º) de feijão-caupi sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013. ....	55
Tabela 7 – Valores médios de número de grãos por vagem no primeiro cultivo de feijão-caupi cultivado em diferentes tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013. ....	55
Tabela 8 – Resumo da análise de variância para potencial hidrogeniônico (pH); teor de matéria orgânica (MO); teor de fósforo (P); teor de potássio (K); teor de sódio (Na); teor de magnésio (Mg); saturação de base (SB) e porcentagem de sódio trocável (PST) de diferentes tipos de solo sob efeito de doses de carvão vegetal. UFERSA, Mossoró-RN, 2013. ....	65
Tabela 9 – Valores médios de teores de magnésio (Mg) em diferentes tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013. ....	75

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Preparação do carvão vegetal: forno de terra com os resíduos de poda de cajueiro (A), fechamento do forno (B), processo de carbonização (C), processo de resfriamento do material carbonizado (D), carvão vegetal após carbonização (E) e carvão vegetal triturado e peneirado (F). UFERSA, Mossoró-RN, 2013.....	36
Figura 2 – Disposição dos vasos com as misturas de solo e carvão vegetal em delineamento experimental com cinco blocos. Mossoró-RN, 2013. ....	38
Figura 3 – Tanque evaporímetro posicionado entre as parcelas experimentais (A) e ampliação do tanque com as bordas de leitura (B). UFERSA, Mossoró-RN, 2013.....	39
Figura 4 – Capacidade de retenção de água em vasos sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013. ....	47
Figura 5 – Densidade de solo sob doses de carvão vegetal aplicadas em cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.....	48
Figura 6 - Porcentagem de emergência de plântulas de feijão-caupi cultivadas sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.....	50
Figura 7 – Altura de plântulas de feijão-caupi cultivadas sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013. ....	52
Figura 8 – Massa seca da parte aérea de feijão-caupi cultivada sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.....	54
Figura 9 – Número de grãos por vagem no primeiro cultivo de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.....	56
Figura 10 – Número de grãos por vagem verde no segundo cultivo de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013. ....	57
Figura 11 – Comprimento médio de vagem no primeiro cultivo de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013. ....	58
Figura 12 – Comprimento médio de vagem verde no segundo cultivo de de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013.....	59
Figura 13 – Massa de 100 grãos no primeiro cultivo de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.....	60
Figura 14 – Massa de 100 grãos verdes no segundo cultivo de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013.....	61
Figura 15 – Produtividade de grãos de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.....	62

Figura 16 – Produtividade de grãos verdes de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013. ....	63
Figura 17 – Potencial hidrogeniônico de diferentes tipos de solo sob efeito de doses de carvão vegetal. UFERSA, Mossoró- RN, 2013. ....	66
Figura 18 – Teor de matéria orgânica de diferentes tipos de solo sob efeito de doses de carvão vegetal. UFERSA, Mossoró- RN, 2013. ....	68
Figura 19 – Teor de fósforo de diferentes tipos de solo sob efeito de doses de carvão vegetal. UFERSA, Mossoró- RN, 2013. ....	70
Figura 20 – Teor de potássio de diferentes tipos de solo sob efeito de doses de carvão vegetal. UFERSA, Mossoró- RN, 2013. ....	71
Figura 21 – Teor de sódio de diferentes tipos de solo sob efeito de doses de carvão vegetal. UFERSA, Mossoró- RN, 2013. ....	73
Figura 22 – Teor de cálcio de diferentes tipos de solo sob efeito de doses de carvão vegetal. UFERSA, Mossoró- RN, 2013. ....	74
Figura 23 – Percentagem de sódio trocável de diferentes tipos de solo sob efeito de doses de carvão vegetal. UFERSA, Mossoró- RN, 2013. ....	77
Figura 24 – Soma de bases trocáveis de diferentes tipos de solo sob efeito de doses de carvão vegetal. UFERSA, Mossoró- RN, 2013. ....	78

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 REFERÊNCIAL TEÓRICO</b> .....	17
<b>2.1 Aspectos gerais da cultura do feijão-caupi</b> .....	17
<b>2.2 Limitações dos recursos naturais</b> .....	19
<b>2.3 Terra Preta do Índio</b> .....	21
<b>2.4 Pirólise</b> .....	22
<b>2.5 Carvão vegetal</b> .....	24
<b>2.6 Carvão vegetal - composição da biomassa</b> .....	25
<b>2.7 Carvão vegetal - condicionador de solo</b> .....	27
<b>2.8 Carvão vegetal em cultivos agrícolas</b> .....	29
<b>2.9 Carvão vegetal – sequestro de carbono</b> .....	31
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	33
<b>3.1 Localização e área experimental</b> .....	33
<b>3.2 Caracterização do solo e da água de irrigação</b> .....	33
<b>3.3 Produção de carvão vegetal</b> .....	346
<b>3.4 Tratamentos e delineamento estatístico</b> .....	36
<b>3.5 Condução do experimento</b> .....	37
3.5.1 Cultivos.....	37
<b>3.6. Determinações realizadas</b> .....	40
3.6.1 Características físicas dos solos.....	40
3.6.2 Características químicas dos solos .....	402
3.6.3 Crescimento inicial das plantas .....	42
3.6.4 Componentes de produção .....	42
<b>3.7 Análises estatísticas</b> .....	43
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	44
<b>4.1 Características físicas do solo</b> .....	44

4.1.1 Capacidade de retenção de água no solo .....	44
4.1.2 Densidade do solo.....	47
<b>4.2 Avaliação do crescimento inicial do feijão-caupi.....</b>	<b>48</b>
4.2.1 Porcentagem de emergência das plântulas .....	49
4.2.2 Altura de plântulas.....	50
4.2.3 Massa seca da parte aérea.....	52
<b>4.3 Componentes de produção do feijão-caupi .....</b>	<b>53</b>
4.3.1 Número de grãos por vagem.....	54
4.3.2 Comprimento de vagens .....	56
4.3.3 Massa de 100 grãos .....	58
4.3.4 Produtividade do feijão-caupi.....	60
<b>4.4 Características químicas do solo .....</b>	<b>63</b>
4.4.1 pH do solo.....	64
4.4.2 Matéria orgânica do solo .....	66
4.4.3 Teor de fósforo no solo.....	68
4.4.4 Teor de potássio no solo .....	70
4.4.5 Teor de sódio no solo .....	71
4.4.6 Teor de cálcio no solo.....	73
4.4.7 Teor de magnésio no solo.....	74
4.4.8 Porcentagem de sódio trocável .....	75
4.4.9 Soma de bases no solo .....	77
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>81</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>96</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) é uma leguminosa de clima tropical, originária da África, amplamente distribuída no mundo e presente nas regiões tropical e subtropical, devido a sua fácil adaptabilidade e plasticidade, além de possuir alto conteúdo proteico, e possuir importância significativa no contexto socioeconômico das regiões Norte e Nordeste do Brasil (Bezerra et al., 2010).

A cultura vem se expandindo para outras regiões, principalmente Centro-Oeste, por ter ampla adaptabilidade às condições tropicais, baixo custo de produção, quando comparada a outras culturas, e pelo intenso trabalho de melhoramento aplicado à cultura nos últimos 20 anos (Freire Filho et al, 2011).

Apesar de ser muito cultivado na Região Nordeste, nesta região são encontradas as produtividades mais baixas, que podem estar relacionadas às diversas condições de cultivo a que o feijão-caupi é submetido, como irregularidade das chuvas ou suprimento inadequado de água para irrigação, fatores fitossanitários, adoção de sistemas de produção de baixo nível tecnológico, limitações edáficas características da própria região, como solos rasos, de baixa fertilidade e pobres em matéria orgânica e, sobretudo, uso de técnicas de manejo inadequados, que não permitem a melhoria nas características dos solos.

A perda de produtividade nas culturas, particularmente o feijão-caupi, é muito afetada pela degradação do solo, que vem crescendo no mundo, com grandes consequências econômicas e sociais. Neste sentido, o aumento da população mundial para nove bilhões de pessoas até 2050, exigirá aumentar a produção de alimentos, por meio da intensificação sustentável da agricultura em solos já ocupados. O aumento de um bilhão de toneladas na produção anual de grãos e de 200 milhões de toneladas na produção de produtos de origem animal é um desafio para o qual são pontos chave os recursos solo e água e a maneira como são manejados (FAO, 2011).

A agricultura intensiva tem provocado problemas de degradação ambiental como perda de biodiversidade e poluição de mananciais de água com fertilizantes e pesticidas, alterando a estrutura natural dos ecossistemas pelo desmatamento e mobilização do solo e afetando o equilíbrio do sistema solo-planta-atmosfera. A adoção de práticas sustentáveis de manejo de solo e água, baseadas no sequestro de carbono e aumento na matéria orgânica do solo (MOS), além de armazenar carbono, beneficia a capacidade de retenção de água (CRA) e nutrientes no solo (FAO, 2011). Entretanto, a acumulação de MOS exige grandes adições de resíduos orgânicos e, ou práticas que dificultem sua decomposição (Janzen, 2006). Por isto,

uma alternativa seria a aplicação ao solo de materiais ricos em carbono em formas recalcitrantes.

O carvão resultante do processo de pirólise é rico em carbono recalcitrante e tem grande potencial como condicionador do solo e/ou fertilizante. Ele resulta da carbonização de resíduos de biomassa, ou de culturas destinadas à sua produção, e pode ser produzido especificamente para aplicação ao solo, com objetivo ambiental e, ou agrônômico por sua resistência à decomposição, alto teor de carbono e grande área superficial devido à porosidade, que é devida ao processo de queima (Madari et al., 2009; Nóbrega, 2011).

O uso do carvão pirogênico nos sistemas agrícolas é inspirado em estudos com as Terras Pretas de Índio da Amazônia (TPI). As TPI são solos antropogênicos, originados da ação de povos indígenas que viveram por séculos nessa região; sua coloração é escura, devido à presença de material orgânico decomposto, de carvão residual de fogueiras domésticas e da queima da vegetação para uso agrícola do solo. Assim sendo, o carvão pirogênico pode ser aplicado ao solo com o objetivo simular as características das TPI (Woods & Mccann, 2001).

Entre os estudos que relatam o efeito da aplicação de carvão pirogênico sobre o solo e culturas, Jeffery et al. (2011), em ampla revisão sobre os efeitos do carvão pirogênico, verificaram que sua adição ao solo proporciona ganhos na produtividade das culturas, com um aumento médio de cerca de 10%, independentemente do tipo de matéria prima e da taxa de aplicação, o qual é atribuído à contribuição do carvão em aumentar pH, retenção de água e disponibilidade de nutrientes.

Em estudo do efeito da aplicação de carvão vegetal na cultura da soja em solos de cerrado, Petter (2010) constatou que a dose de 16 t ha<sup>-1</sup> aumentou significativamente o teor de C total na camada de 0-10 cm do solo no 1º ano e, no 3º ano, na camada de 10-20 cm. As doses de 8 e 16 t ha<sup>-1</sup> de carvão proporcionaram maiores alturas e massa seca das plantas nas épocas avaliadas. O mesmo autor, estudando a cultura do arroz, observou aumento significativo no pH e teores de P e Ca, e redução em Al e H+Al na camada de 0-10 cm, quando aplicou 32 t ha<sup>-1</sup> de carvão. A produtividade do arroz aumentou com o incremento da dose de carvão vegetal, tendo a maior eficiência no uso do N, P e K ocorrido com a dose de 32 t ha<sup>-1</sup>.

Os efeitos da aplicação de carvão pirogênico nos solos e nas culturas podem variar significativamente, em função da variação de suas propriedades, que dependem da qualidade e quantidade da biomassa e das condições de carbonização, além da variabilidade espacial dos solos. Apesar disso, a aplicação do carvão se apresenta como alternativa para melhorar o desempenho produtivo de culturas como o feijão-caupi, especialmente na agricultura familiar,

pois pode promover aumento da rentabilidade e melhoria da qualidade de vida no meio rural, promovendo a manutenção da capacidade produtiva dos solos, incorporando carbono orgânico de uma forma mais estável que o proveniente de materiais orgânicos não decompostos.

Dessa forma, este trabalho visou analisar a aplicação de um sistema de manejo sustentável, com o aproveitamento de resíduos agrícolas para reproduzir o modelo de carvão pirogênico citado na literatura. Para tal, foram avaliados os efeitos da aplicação ao solo de carvão vegetal sobre atributos físico-hídricos e químicos de distintos solos e sobre componentes de produção em dois cultivos sucessivos de feijão-caupi.

## 2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

### 2.1 Aspectos gerais da cultura do feijão-caupi

O feijão-caupi é uma dicotiledônea, pertencente à ordem Fabales, família Fabaceae, subfamília Faboideae, tribo Phaseoleae, subtribo Phaseolina, gênero *Vigna* e espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp. Feijão-caupi é a denominação técnica, mas também é vulgarmente conhecida como feijão-de-corda, feijão macassar, feijão-fradinho, feijão-de-praia, feijão gerutuba, feijão-trepa-pau, feijão miúdo (Guedes, 2008).

Acredita-se que o feijão-caupi, originário da África, foi introduzido na América Latina no século XVI pelos colonizadores espanhóis e portugueses. Foi introduzido no Brasil, provavelmente pelo Estado da Bahia (Freire Filho, 1988), sendo levado pelos colonizadores para outras áreas da região Nordeste, e para as demais regiões do País.

É uma cultura de grande importância social e econômica, sendo também considerada uma das principais culturas nos sistemas agrícolas familiares. Os grãos do feijão-de-corda são fontes dos aminoácidos tiamina e niacina, além de fibras dietéticas, por isso é uma boa opção para a melhoria da qualidade de vida, especialmente da população carente no meio rural e urbano (Fonseca et al., 2010). Apresenta ciclo curto, baixa exigência hídrica e rusticidade para se desenvolver em solos de baixa fertilidade e, por meio da simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium*, têm a habilidade para fixar nitrogênio do ar (Andrade Júnior et al., 2002).

Pelo seu valor nutritivo, o feijão-caupi é cultivado principalmente para a produção de grãos, secos ou verdes, visando o consumo humano in natura, na forma de conserva ou desidratado. Além disso, também é utilizado como forragem verde, feno, ensilagem, farinha para alimentação animal e, ainda, como adubação verde e proteção do solo (EMBRAPA, 2014).

Dados da FAO sobre a produção mundial de feijão-caupi, no ano de 2007, indicam que a cultura atingiu 3,6 milhões de toneladas em 12,5 milhões de hectares. Produção essa alcançada em 36 países, destacando-se entre os maiores produtores a Nigéria, o Níger e o Brasil, que, em conjunto, representam, respectivamente, 84,1% da área e 70,9% da produção mundial. É importante mencionar que no Brasil não há uma diferenciação entre os dados estatísticos do feijão comum e feijão-caupi fornecidos pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), ou seja, às espécies *Phaseolus vulgaris* (L.) e *Vigna unguiculata* (L.) Walp (EMBRAPA, 2014).

O feijão-de-corda é tradicionalmente plantado no Nordeste brasileiro e vem se expandindo para outras regiões do Brasil, principalmente para o Centro-Oeste, em razão da sua ampla adaptabilidade às condições tropicais e ao baixo custo de produção (Freire Filho et al., 2011).

A produção média anual de feijão-caupi no Brasil, no período de 2005 a 2009, foi de 513.619 t. Neste mesmo período, a região Nordeste teve uma produção média anual de 426.367 t, devido a sua grande participação na área cultivada, confirmando sua superioridade em relação a outras regiões produtoras. Entretanto, apresentou a menor média de produtividade ( $330 \text{ kg ha}^{-1}$ ), em relação às demais regiões. Nessa região, as condições de cultivo não são satisfatórias, sendo necessário mais investimento em tecnologia de produção.

Na região Centro-Oeste, pode-se destacar o salto de produção que foi de 3.759 t, em 2006, para 104.349 t, em 2009, com uma produtividade média anual, no período, de  $960 \text{ kg ha}^{-1}$ , valor bem superior ao da média nacional, que foi de  $369 \text{ kg ha}^{-1}$ , evidenciando como uma alternativa importante para os arranjos produtivos desta região, especialmente no cultivo de safrinha (Freire Filho et al., 2011).

De acordo com Freire Filho et al. (2011), o feijão-caupi vem passando por grandes transformações, tanto no setor produtivo, quanto na expansão do cultivo para outras regiões e também no setor comercial, com uma melhor padronização do produto, com o início do processamento industrial e com a entrada do produto em novos mercados do país e do exterior.

O desenvolvimento e o lançamento de variedades melhoradas de ciclo curto de maturação (60-70 dias) com altas produtividades fizeram com que a produção do feijão-caupi, no mundo, aumentasse cerca de seis vezes nas últimas décadas. Uma revolução silenciosa, mas em maior magnitude em comparação com a de cereais e de todas as demais leguminosas (Singh et al, 2010).

Segundo Aquino & Nunes (1983), a baixa produtividade no Nordeste brasileiro está relacionada principalmente à utilização de variedades tradicionais. Por apresentarem características genéticas, fisiológicas e morfológicas peculiares ao genótipo (Santos et al., 2009), as cultivares de feijão-caupi respondem de forma diferenciada às condições ambientais dos locais de cultivo. Silva et al. (2014), avaliando oito cultivares de feijão-caupi em Vitória da Conquista - BA, obtiveram os maiores valores para a massa de 100 grãos nas cultivares BRS Guariba, BRS Marataoã, BRS Pajeú, BRS Itaim, BRS Potengi e BRS Cauamé, além de serem superiores aos encontrados por Freire Filho et al. (2011) para essas mesmas cultivares.

O lançamento de novas variedades de feijão-caupi tem permitido usar genótipos que,

além de serem resistentes à doenças, possuem caracteres agronômicos altamente favoráveis à produção de grãos secos e verdes (Rocha et al; 2007; Machado et al. 2008; Matos Filho et al. 2009; Andrade et al. 2010; Benvindo et al. 2010; Barros et al. 2011; Freire Filho et al. 2011).

A produção de grãos verdes tem um grande potencial para a expansão do consumo, sendo uma boa opção de renda para agricultores familiares. Em estudo de Silva et al. (2013), um grupo de genótipos de feijão-caupi foi avaliado para vários caracteres associados com a produção de feijão-verde. Os autores encontraram que as cultivares BRS Potengi, BRS Tucumaque, BRS Guariba, BRS Itaim, BRS Caumé e Paulistinha apresentam potencial para a produção de grãos verdes em Serra Talhada-PE, sob regime irrigado.

Entretanto, a maior expressão do potencial produtivo do feijão-caupi, assim como de qualquer outra cultura, é resultado da combinação de um conjunto de fatores, tais como: ambiente (temperatura, umidade, fotoperíodo), técnicas de manejo da cultura, disponibilidade de água, condições edáficas, dentre outras. Sendo de extrema importância também a mudança no processo produtivo, com a adoção de técnicas e manejos que minimizem os efeitos da degradação ambiental e melhorem a qualidade de vida na área agrícola, além de preservar a capacidade produtiva dos solos.

Diante da importância da cultura do feijão-caupi para o Brasil e da busca pela adoção de sistemas mais sustentáveis, são necessários estudos envolvendo o uso de carvão vegetal no cultivo de feijão-caupi, pois permitirá aos produtores utilizarem os recursos da própria propriedade, diminuindo a dependência e os gastos com insumos externos.

## **2.2 Limitações dos recursos naturais**

A importância do solo na sustentabilidade de ecossistemas terrestres é evidente, por ser um corpo natural e dinâmico e responsável por funções ambientais, especialmente para a produção agrícola, uma vez que proporciona meio adequado para o desenvolvimento de plantas e suporte para animais e micro-organismos e por exercer regulação do fluxo de água e nutrientes para as plantas. Na medida em que se intensifica o seu uso agrícola, os atributos físico-hídricos do solo sofrem alterações, geralmente adversas ao crescimento vegetal, que ficam mais nítidas quando os sistemas de uso são comparados com o estado do solo ainda sob vegetação natural (Santos et al., 2011).

A produção agrícola mundial triplicou nos últimos 50 anos, principalmente devido a maior produtividade por unidade de terra e intensificação dos cultivos. O fornecimento de

alimentos per capita global aumentou de 2.200 kcal/dia no início dos anos 1960 para mais de 2.800 kcal/dia em 2009 (FAO, 2013). Entretanto, em relatório sobre a situação dos recursos solo e água no mundo (FAO, 2011), aponta-se que em muitos locais o grande aumento observado na produção alimentar está associado a práticas de manejo que têm degradado os sistemas solo e água, dos quais a produção alimentar depende.

A utilização de práticas não sustentáveis, resultantes da implantação de sistemas agrícolas, tem acarretado alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e, conseqüentemente, redução na capacidade dinâmica e vital deste recurso, diminuindo a sua qualidade e, muitas vezes, dificultando a sua recuperação (Costa et al., 2003; Nunes, 2003; Cunha et al., 2010). Entre as conseqüências da adoção de práticas inadequadas de manejo que degradam o solo estão, a erosão hídrica e eólica, perda de matéria orgânica, compactação do solo, salinização e poluição do solo e perda de nutrientes, com prejuízos à produção de biomassa, acúmulo de carbono, saúde do solo, suprimento de água e biodiversidade. A baixa fertilidade e baixo teor de carbono do solo, em condições de sequeiro, podem gerar produtividades inferiores à capacidade produtiva das culturas.

A degradação generalizada e o aprofundamento da escassez dos recursos do solo e da água colocam em risco vários sistemas essenciais de produção alimentar no mundo: um quarto das terras aráveis do mundo está altamente degradado, 8% estão moderadamente degradadas, 36% ligeiramente degradadas ou estáveis e apenas 10% apresentam melhoria em suas condições (FAO, 2011). Outro aspecto relevante é a contribuição da agricultura para a emissão de gases de efeito estufa, que é de 13,5% das emissões globais destes gases. Ao mesmo tempo, as mudanças climáticas podem resultar em maior risco e incerteza para os agricultores, devido ao aquecimento, com possível aridez e mudanças no regime das chuvas.

A baixa produtividade de solos agrícolas em sistemas de sequeiro é atribuída à baixa fertilidade inerente do solo, severa depleção de nutrientes, solo desestruturado e práticas inadequadas de manejo. Neste sentido, as recomendações aos governos, de FAO (2011), visam a mudança gradual para agricultura mais sustentável e menos intensiva em carbono, menor consumo de energia ou emissões de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), com manejo mais ecológico de solo e água pelos agricultores. Para isso, são citadas práticas integradas de produção, como agricultura conservacionista, integração silvo-agro-pastoril, ou irrigação, as quais devem ser adaptadas aos ecossistemas locais, cultura e mercado. A adoção de práticas focalizadas nos ciclos de carbono e nitrogênio podem beneficiar o sequestro de carbono e mitigar a emissões de gases. O aumento no teor de MOS proporciona benefícios como a melhoria no armazenamento de água e retenção de nutrientes no solo.

## 2.3 Terra Preta do Índio

Evidências arqueológicas indicam que atividades humanas antigas na região amazônica transformaram significativamente as paisagens na vizinhança dos seus assentamentos, notadamente no período pré-histórico tardio. Um registro marcante disso são as áreas de solo que foram afetadas pelo homem pré-histórico, que apresentam cor escura, restos de material arqueológico (fragmentos cerâmicos e de artefatos líticos) e alto teor de Ca, Mg, Zn, Mn, P e C. Em função da coloração escura da camada superficial, tais solos são conhecidos como Terra Preta Arqueológica (TPA), Terra Preta de Índio (TPI) ou Terra Preta (TP), além de uma variante menos divulgada, a Terra Mulata (TM) (Kampf & Kern, 2005). Esses solos possuem características diferentes das dos solos não antropizados adjacentes, sendo resultantes da atividade agrícola pré-histórica, permanente ou semipermanente (Kern et al., 2003).

As Terras Mulatas são solos de cores bruno-acinzentadas e com elevado teor de matéria orgânica, porém com teores de Ca e P inferiores aos das TPA e menor quantidade ou mesmo ausência de artefatos de cerâmica.

No Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013), a principal particularidade das TPAs e TMs é a presença de um horizonte A Antrópico, formado ou modificado pelo uso contínuo do homem, como lugar de residência ou cultivo por períodos prolongados, com adição de material orgânico, em mistura ou não com material mineral, contendo fragmentos de cerâmica e, ou artefatos líticos, e, ou restos de ossos e, ou conchas.

As terras pretas têm maior proporção de C na fração de ácidos húmicos, ao contrário dos solos adjacentes, onde há predomínio da fração de ácidos fúlvicos. As frações húmicas são mais estáveis em função da maior quantidade de grupamentos aromáticos, de anéis benzênicos, do maior grau de polimerização e da menor suscetibilidade ao ataque microbiano, proporcionando alto tempo de residência do material (Preston & Smith, 2006).

A coloração escura das TP deve-se principalmente à presença de material orgânico decomposto, em parte na forma de carvão residual de fogueiras domésticas e da queima da vegetação para uso agrícola do solo. Os elevados teores de C orgânico, bem como os de P, Ca e de Mg, são resultantes da deposição de cinzas, resíduos de peixes, conchas, caça, dejetos humanos, entre outros compostos orgânicos.

As TP não são homogêneas quanto à fertilidade e potencial produtivo, podendo haver diferenças em fertilidade entre as TP de uma mesma região, e inclusive grande variabilidade dentro de uma mancha de solo (Lehmann et al., 2003). Apesar dessas diferenças, algumas

propriedades importantes ligadas ao grau de fertilidade são comuns na maioria das Terras Pretas, como: alto teor de carbono orgânico com propriedades físico-químicas particulares (em grande parte pirogênico) e elevados teores de fósforo, cálcio e micronutrientes, comparados a solos adjacentes, como Argissolos e Latossolos, entre outros.

A chave para a formação da Terra Preta e sua fertilidade duradoura parece ter sido a prática frequente de algum método de queima, do qual restou carvão, que, ao contrário das cinzas, não é degradável. Essa “queima fria” poderia ser uma forma de “picar e queimar” (*slash and char*), onde o material oriundo da limpeza do terreno é queimado ainda úmido, resultando em combustão incompleta; ao contrário da prática adotada atualmente, na qual os restos vegetais são secos por um longo período para só então serem queimados. O carvão resultante da “queima fria”, juntamente com os altos níveis de micro-organismos no solo, aparentemente, criou a alta fertilidade das TP (Denevan, 2012).

A alta fertilidade das TPI, e particularmente sua sustentabilidade, é atribuída aos seus elevados teores de matéria orgânica e suas propriedades físico-químicas. Esses solos têm teor de carbono de até  $150 \text{ g kg}^{-1}$ , enquanto que nos solos adjacentes esses valores são de apenas 20-30  $\text{g kg}^{-1}$  (Sombroek et al., 1993; Woods & Mc Cann, 2001; Glaser et al., 2001). Além disso, a camada enriquecida de carbono pode alcançar 200 cm, com média de 40-50 cm, enquanto que nos solos adjacentes ela se limita aos 10-20 cm iniciais.

Assim, o estoque de carbono nas TPI pode ter uma ordem de magnitude maior e ser até seis vezes mais estável que nos solos adjacentes. Esse carbono adicional está principalmente na forma de carbono pirogênico e também acentua a coloração escura do solo.

Em relação às propriedades físicas, sabe-se que as TPI apresentam horizonte A antrópico mais arenoso do que em áreas adjacentes, fato atribuído ao uso intenso do fogo que, associado à deposição de material orgânico, forma partículas organominerais estáveis semelhantes às da fração areia (Smith, 1980; Teixeira et al., 2009). Os solos antropogênicos são solos bem drenados, com densidade do solo baixa, fato que se dá, possivelmente, pela influência da MOS (Kern & Kampf, 1989).

## 2.4 Pirólise

O termo genérico pirólise (do grego *pyros* = fogo e *lyses* = quebra) é utilizado principalmente em tecnologias de conversão termoquímica de biomassa. A pirólise é um

processo de decomposição térmica, em temperaturas entre 400 °C e 800 °C, na ausência total ou parcial de oxigênio, convertendo a matéria-prima da biomassa em carvão (sólido), alcatrão (combustível líquido) e gás, contendo CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros hidrocarbonetos (Nóbrega, 2011).

O carbono pirogênico resulta da carbonização (pirólise) parcial ou total, principalmente de materiais ligno-celulósicos, sendo composto de unidades poliaromáticas condensadas, deficientes em hidrogênio e com diferentes tamanhos e níveis organizacionais (Kramer et al., 2004). Esse material está presente em diversos ambientes e possui propriedades de grande interesse ambiental e agrônômico, tais como: (a) alta estabilidade, devido à presença de estruturas aromáticas condensadas, o que confere importante papel no sequestro de carbono; (b) elevada reatividade, decorrente da oxidação parcial de sua estrutura aromática, dando origem a grupos funcionais ácidos e recalcitrantes, principalmente carboxílicos, que contribuem para o aumento da capacidade de troca catiônica, especialmente em solos altamente intemperizados, constituídos por minerais de baixa atividade e (c) elevada porosidade e área superficial, sendo refúgio para microorganismos, tais como micorrizas, que produzem mucopolissacarídeos importantes para a agregação dos solos e que, em associação com o sistema radicular das plantas, podem aumentar a capacidade de absorção destas (Cunha et al, 2009).

O carvão pirogênico constitui uma forma altamente recalcitrante de carbono orgânico devido a sua estrutura poliaromática, sendo resistente à oxidação termal, química e fito-oxidação. Embora sofra alguma degradação no ambiente, sua incorporação ao solo é um mecanismo importante no sequestro de carbono, principalmente em solos tropicais, sujeitos às condições climáticas que favorecem a mineralização da matéria orgânica e onde a fração argila dos solos apresenta baixos valores de CTC (Novotny et al., 2007; Paz & Souza, 2010).

A pirólise a temperaturas relativamente baixas, entre 300°C e 500°C, altera as propriedades químicas do carbono da biomassa, formando estruturas mais resistentes à degradação pelos micro-organismos do solo, em comparação com o material original. A pirólise lenta proporciona maior rendimento de carvão (Nóbrega, 2011). Por isso, materiais orgânicos que seriam rapidamente decompostos, permitindo a liberação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros gases responsáveis pelo aumento do efeito estufa, são transformados em carvão pirogênico, que se degrada lentamente, criando no solo um estoque de carbono de longo prazo (Mangrich et al., 2011).

Os diferentes métodos de conversão termoquímica da biomassa, utilizando diferentes configurações de equipamentos e operando de modo particular, produzem diferentes produtos

(Rocha et al, 2004). A composição da biomassa apresenta um papel importante na distribuição dos produtos da pirólise, pois cada material exibe características particulares quando é pirolisado, devido à proporção dos componentes que o constituem, como carbono fixo, material volátil, matéria mineral (cinzas) e umidade.

## 2.5 Carvão pirogênico

A ideia do uso do carvão pirogênico, ou seja, do carvão proveniente da biomassa, surgiu de estudos da matéria orgânica das Terras Pretas de Índios (TPI), solos amazônicos antropogênicos com excelentes características agronômicas e ambientais, alta fertilidade e alto conteúdo de carbono estável em sua fração orgânica, o que forneceu um modelo de solo adequado ao sequestro de carbono (Novotny, 2009).

O carvão pirogênico é um material adequado para se reproduzir o modelo TPI, por apresentar grupos aromáticos condensados, que garantem sua recalcitrância (resistência à degradação química), tendo potencial como material eficiente para sequestro de carbono e condicionador do solo, pois melhora características relativas à absorção de água e penetração de raízes (Maia, 2010).

O carvão pirogênico é derivado de materiais ligno-celulósicos carbonizados por meio da pirólise, e podem ser produzidos para serem aplicados ao solo de uma forma deliberada, com a intenção de melhorar as suas propriedades químicas, físicas e biológicas. Isto distingue o carvão pirogênico do carvão utilizado como combustível, para aquecimento, como filtro e como redutor em siderurgias (Lehmann & Joseph, 2009).

As propriedades físicas e químicas específicas do carvão pirogênico, tais como alta porosidade (Liang et al., 2006), que auxilia na retenção de água (Lehmann et al., 2003) e a natureza particulada (Skjemstad et al., 1996; Lehmann et al., 2005), combinadas com a estrutura química específica (Baldock & Smernik, 2002) promovem maior resistência à degradação microbiana do que outros compostos orgânicos (Shindo, 1991; Cheng et al., 2008).

Em relação à densidade, importante característica física do carvão pirogênico, Pastor-Villegas et al. (2006) observaram que, mesmo produzido a partir de diferentes tipos de madeiras e em diferentes tipos de fornos tradicionais, ele apresenta densidade específica entre  $0,30 \text{ g cm}^{-3}$  e  $0,43 \text{ g cm}^{-3}$ . A resistência mecânica do carvão pirogênico está relacionada à sua densidade e é uma característica usada para definir a qualidade do carvão ativado, no que se

refere à sua capacidade de resistir ao desgaste durante o uso; o mesmo pode ser atribuído ao carvão pirogênico (Aygün et al., 2003).

A porosidade do carvão pirogênico é responsável pela maior parte das superfícies de cargas reativas. As estruturas periféricas reativas podem ser hidrofílicas, hidrofóbicas, altamente ou parcialmente reativas, sendo essa variação em função da eletronegatividade de grupos funcionais que se ligam ao carbono das estruturas aromáticas, tais como OH, NH<sub>2</sub>, OR, ou O (C=O) R, o que gera uma heterogeneidade química de superfície (Brennan et al., 2001).

A partir do modelo do solo com estrutura e propriedades conhecidas, é possível encontrar materiais e técnicas que possam reproduzi-lo através de práticas agrícolas (Novotny et al., 2009). Assim sendo, qualquer fonte de biomassa carbonizada para uso no solo com finalidade de sequestrar carbono e aumentar a qualidade agrônômica do solo pode ser considerado carvão pirogênico. Essa tecnologia tem potencial global de sequestro de CO<sub>2</sub> atmosférico da escala de bilhões de toneladas no espaço de 30 anos. No entanto, os resultados publicados se referem a estudos de uso em pequena escala, impedindo generalizações para diferentes regiões geográficas e tipos de carvão vegetal (Sohi et al., 2010).

A alta capacidade de troca de cátions (CTC; 40–80 cmol kg<sup>-1</sup>) e alta superfície específica (51–900 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>) são características benéficas do carvão pirogênico para aplicação ao solo, promovendo aumento no pH solo e CRA, além da afinidade por micro e macronutrientes para as plantas. Esses benefícios podem ser similares aos conferidos pela MOS. No contexto das mudanças climáticas, o uso de carvão pirogênico é uma proposta de manejo sustentável, pois melhora propriedades químicas (CTC, pH, disponibilidade de nutrientes), físicas (retenção de água e densidade) e biológicas (atividade microbiana) do solo, além de sequestrar carbono. Alguns benefícios apregoados da aplicação de carvão pirogênico são aumento na produtividade das culturas, redução em frequência e lâmina de água e custos de irrigação e economia de combustível devido à redução na resistência do solo aos implementos de preparo (Streubel et al., 2011; Peake et al., 2014).

## **2.6 Carvão pirogênico - composição da biomassa**

As propriedades do carvão pirogênico são muito influenciadas pelas características da matéria-prima (biomassa) e pelas condições de pirólise, sendo biomassa a massa total de organismos vivos numa dada área (Bernardino & Tavares, 2010), cujos componentes são a

celulose, hemicelulose e lignina, com pequenas quantidades de minerais. Estes constituintes variam consideravelmente dependendo do tipo de biomassa, ou para um mesmo tipo, dependendo do solo, das condições climáticas e do momento de colheita (Nobrega, 2011).

Apesar da vantagem do carvão pirogênico ser produzido a partir de uma grande variedade de matérias-primas em diferentes condições de pirólise, o seu alto teor em carbono e a sua forte estrutura aromática são características constantes e, em grande parte, as responsáveis pela sua estabilidade química. Da mesma forma, seu pH apresenta pouca variabilidade entre os diferentes tipos de carvão, sendo tipicamente superior a sete (Lehman et al., 2009).

A composição química do carvão pirogênico é altamente heterogênea, contendo componentes estáveis e lábeis. Geralmente, os principais constituintes são o carbono fixo, matéria volátil, matéria mineral (cinzas) e umidade. As diferentes proporções relativas, normalmente encontradas em carvões pirogênicos, são obtidas devido a se utilizar diferentes matérias primas e diferentes condições de pirólise. Estas proporções determinam o comportamento físico e químico de todo o carvão (Brown, 2009), o que por sua vez determina a sua aptidão para uma destinação específica, bem como o seu transporte e destino no ambiente.

Além dos constituintes citados, o carvão pirogênico contém vários nutrientes (H, N, P, K, S, O) para as plantas, podendo ser valioso como corretivo do solo. Os níveis de nutrientes no carvão pirogênico dependem da composição original da biomassa e das condições da pirólise, apesar de alguns dependerem apenas do tipo de biomassa, independente das condições de pirólise.

A qualidade da matéria-prima, método e condições de pirólise (Bruun et al., 2012), sua hidrofobicidade (Kinney et al., 2012), disponibilidade de oxigênio, dentre outros fatores, interferem na quantidade produzida, além da distribuição, proporção relativa e reatividade dos grupos funcionais dos carvões. A produção do carvão pirogênico requer a moagem e secagem prévia da biomassa, de modo a garantir maior eficiência do processo de pirólise, favorecida em condições de temperaturas (400°C) e taxa de aquecimento baixas. O aumento da temperatura e taxa de aquecimento pode reduzir a produção de carvão e aumentar a de gás (Ertas & Alma, 2010), além de interferir no tempo de residência dos produtos finais.

A aplicação a solos agrícolas de carvão vegetal produzido a partir de matéria prima herbácea ou lenhosa tem efeitos variáveis sobre as propriedades dependendo do tipo de solo, matéria prima do carvão vegetal e dose aplicada (Streubel et al., 2011). Em geral, o carvão vegetal produzido de plantas lenhosas é mais rico em carbono (C), tem baixo teor de

nitrogênio (N) e capacidade de troca catiônica (CTC) baixa. O carvão produzido de estrumes tem baixo teor de C, alto teor de N e de CTC. Em ambos os casos, o pH varia entre o neutro e o alcalino (Nóbrega, 2011).

Outro aspecto importante é que a produção de carvão pirogênico é destino alternativo para diversos tipos de resíduos, tais como: resíduos orgânicos urbanos sólidos (restos de podas de árvores, lodo de esgoto), resíduos agrícolas (restos de culturas e de forragens, bagaço e palha de cana-de-açúcar, casca de arroz) e florestais (galhos, cascas, cavacos), resíduos industriais (da indústria de papel e celulose), ou materiais de origem animal (de laticínios, ossos, esterco) (Mangrich et al., 2011; Streubel et al., 2011).

Muitas vezes, parte dos resíduos agrícolas é deixada no campo, servindo como proteção e fonte de nutrientes para o solo, mas quando estão em quantidade excessiva, podem se tornar problema pela interferência em outras atividades agrícolas, emissões de metano durante a decomposição, contaminação de águas subterrâneas e superficiais e favorecimento à propagação de pragas e incêndios. Nas áreas urbanas, um dos mais sérios problemas ambientais é a disposição final dos resíduos sólidos produzidos. Nesse sentido, o ideal para a fração orgânica dos resíduos sólidos seria sua estabilização através de processos biológicos.

## **2.7 Carvão pirogênico - condicionador de solo**

O uso do carvão pirogênico como condicionador vem sendo muito estudado, visando melhorar características químicas, físicas e biológicas do solo. Em relação a características biológicas, sabe-se que a degradação do carvão no solo pode ser abiótica ou biótica, que causa aumento na atividade microbiana sobre o mesmo e no solo. O carvão, quando ocorre como fragmentos muito pequenos e devido a ser muito poroso, se constitui em habitat protegido favorecendo o aumento da atividade microbiana no solo (Pietikainem et al., 2000; Maekawa, 2002; Madari et al., 2009).

Quanto ao efeito positivo do carvão pirogênico sobre propriedades físico-hídricas de solos, alguns autores relatam que o carvão pirogênico encontrado no solo, ou o carvão aplicado ao solo e em recipientes para produção de mudas, causa aumento significativo na capacidade de retenção de água, especialmente em solos de textura arenosa. Isso se deve à estrutura muito porosa do carvão, no qual cerca de 70-80% do volume é formado por poros, e ao pequeno tamanho dos seus fragmentos (Pietikainem et al., 2000; Maekawa, 2002; Madari et al., 2009). Neste aspecto, Glaser et al. (2002) observaram aumento de 18% na CRA em

solos contendo carvão pirogênico em relação a solos com pouco ou nenhum carvão. Enquanto que Asai et al. (2009) observaram aumento na condutividade hidráulica saturada do solo após a aplicação de carvão pirogênico.

A quantidade de poros do carvão pirogênico é relativamente fixa, enquanto que nos solos esta quantidade é determinada principalmente pela textura. Todavia, pode esperar que os aumentos na retenção de água a partir da adição de carvão pirogênico são maiores em solos arenosos, tem efeito neutro em solos de textura média, e insignificantes em solos argilosos (Sohi et al., 2010). Neste sentido, Herath et al. (2013) e Elad et al. (2010) obtiveram resultados semelhantes quanto ao aumento de macro e micro porosidade no solo, bem como na melhoria na drenagem do mesmo após aplicação de carvão. Além da porosidade, a maior disponibilidade de água em solos enriquecidos com carvão pirogênico é devida ao teor mais elevado de MOS, sugerindo um efeito combinado do carvão em si e dos níveis mais elevados de matéria orgânica que ele promove (Glaser et al., 2002).

Segundo Morales (2010), o carvão pirogênico possui grande importância devido aos processos biogeoquímicos do solo, como as reações de adsorção de nutrientes, cuja maior retenção ocorre devido ao aumento na capacidade de troca catiônica. A lenta biodegradação de carvões no solo resulta na mobilização do carbono e altera propriedades de superfície do carvão, aumentando a concentração de sítios quimicamente reativos, que podem estar ligados a vários nutrientes do solo. Nesse sentido, Glaser et al. (2003) sugerem que os processos de oxidação do carbono aromático, presente em grande quantidade na superfície do carvão, seja a principal razão para a elevada CTC observada em solos TPI, levando à formação de grupos carboxil entre outros grupos funcionais, com carga líquida negativa na escala de pH dos solos.

Em virtude de sua porosidade, fragmentos de carvão podem reduzir a lixiviação de nutrientes mantendo estável a fertilidade do solo e, conseqüentemente, a produtividade e a sustentabilidade agrícola. Eles podem formar compostos que retêm nutrientes, seja em solos ou em recipientes para produção de mudas, tornando a adubação mais eficiente (Pietikainen et al., 2000; Glaser et al., 2003; Steiner et al., 2004).

Pequenos fragmentos de carvão contêm elementos minerais, tais como: magnésio, boro, silício, cloro, cobre, manganês, molibdênio e potássio. Suas cinzas são um componente muito importante, pois contém predominância de minerais como potássio, cálcio, fósforo e sódio (Maekawa, 2002; Madari et al., 2009). Em estudo de Novak et al. (2009), após 67 dias de incubação em casa de vegetação, a adição ao solo de carvão de casca do fruto de nogueira-pecã, foi observado aumento no pH do solo, no carbono orgânico total e em alguns nutrientes, havendo diminuição na acidez trocável, nos teores de S e Zn. Os autores concluíram que o

material apresentou alta capacidade de sorção de nutrientes como Ca, P, Zn e Mn.

Neste aspecto, a aplicação de carvão pirogênico promoveu aumento na produtividade de grãos de arroz em solo com pouca disponibilidade de fósforo e melhoria na resposta do solo à aplicação de nitrogênio e nitrogênio + fósforo (Asai et al., 2009). Em relação ao fósforo, Albuquerque et al. (2013) observaram que os carvões obtidos de palha de trigo e de resíduos da poda de oliveiras liberavam P no solo após dois meses de incubação em casa de vegetação.

Além disso, a quantidade de potássio contido no carvão promoveu aumento nos teores de potássio trocável do solo. Também foi observada melhoria em atributos físicos como porosidade e aeração em solo cultivado com batata doce, benefícios esses que criaram ambiente favorável à absorção de potássio pela cultura, promovendo aumentos na concentração de K em suas raízes e na produtividade da batata doce.

## **2.8 Carvão pirogênico em cultivos agrícolas**

O solo é um sistema aberto que troca matéria e energia com o meio e atinge um estado estável quando as taxas de adição e de perda se equivalem (Addiscot, 1992). Dentro deste conceito, a adição de MOS ocorre via adição de C pela síntese de compostos orgânicos no processo de fotossíntese, que no caso da vegetação natural encontra-se em equilíbrio. Entretanto, sob intervenção humana, a quantidade de carbono adicionado depende das espécies e dos sistemas de cultivos utilizados, enquanto que as perdas de C ocorrem principalmente por liberação de CO<sub>2</sub> na respiração, decomposição microbiana da MOS e perdas dos compostos orgânicos por lixiviação e erosão. A magnitude desses processos depende direta ou indiretamente do manejo do solo (Mielniczuk, 2008).

O desenvolvimento e a adoção de novos sistemas de produção que sejam adequados para as diferentes condições ambientais têm aumentado a cada dia, tendo sido verificado aumento considerável em pesquisas voltadas para o estudo do armazenamento do carbono no solo, como medida para reduzir impactos ambientais negativos (Petter et al., 2012).

Em solos altamente intemperizados de regiões tropicais a MO tem grande importância como fonte de nutrientes, na retenção de cátions, complexação de elementos tóxicos, estabilidade da estrutura, infiltração, retenção de água e aeração, além de servir como fonte de nutrientes e energia para os microrganismos do solo, constituindo-se, assim, num componente fundamental do potencial produtivo destes solos (Bayer & Mielniczuk, 2008).

Neste contexto, um dos potenciais do carvão pirogênico está no seu efeito sobre o crescimento, desenvolvimento e produtividade de culturas agrícolas e florestais, especialmente nos solos onde a matéria orgânica é essencial para a fertilidade do solo. A aplicação de diferentes tipos de carvão, provenientes de diversos materiais vegetais, promove resultados variáveis em relação à disponibilidade de nutrientes no solo, crescimento e produtividade das culturas. Nesse sentido, Biederman & Harpole (2013) recomendam a aplicação do carvão vegetal alguns meses antes do plantio e afirmam que a resposta das culturas é maior se houver aplicação conjunta de carvão vegetal e adubo nitrogenado.

Em ampla revisão realizada por Jeffery et al. (2011) foi observado aumento médio de 10% na produtividade de diversas culturas após a aplicação de carvão pirogênico ao solo. Apesar disso, Gaskin et al. (2010) testaram a adição ao solo de carvões derivados de casca de amendoim e de casca de pinus. O primeiro tipo aumentou a concentração de bases trocáveis e do pH do solo, efeito que não se sustentou até a segunda safra, provavelmente devido à absorção de nutrientes pela cultura ou perdas por lixiviação, pois o trabalho foi conduzido em solo muito arenoso. Enquanto isso, o carvão de casca de pinus não elevou o pH do solo no primeiro ano após a aplicação, possivelmente por conter baixo teor de cátions básicos. O estudo não obteve benefício do carvão sobre a produção de milho, mas também não se observou redução na produção ou indução de deficiências nutricionais, devendo-se salientar seu potencial do ponto de vista de sequestro de C.

Similarmente, Liang et al. (2014) não encontraram diferenças significativas na produtividade de milho e trigo com a aplicação de carvão pirogênico (30, 60 ou 90 t ha<sup>-1</sup>) durante três anos de avaliação. Entretanto, Oguntunde et al. (2004) observaram aumento ao redor de 91% na produtividade de grãos de milho e de cerca de 44% na biomassa em solo recebendo carvão, comparado a solo que não recebeu. Além disso, os autores observaram um aumento de cerca de 329% na disponibilidade de K. Isso pode estar atribuído as diferentes fontes de biomassa constituindo o carvão, que, no primeiro trabalho, foi proveniente da mistura de casca de arroz e casca de semente de algodão e, no segundo, da casca de pinus.

Na cultura da berinjela, Lima et al. (2013) estudaram a aplicação de carvão pirogênico obtido de diversas matérias primas e observaram que o carvão de esterco bovino beneficiou a produção de mudas, principalmente nos parâmetros número de folhas e altura de mudas. Na cultura de alface, Petter et al. (2012) observaram que o carvão obtido de madeira adicionado ao substrato comercial Germinar® melhorou o desempenho agrônômico das mudas, aumentando a altura da planta, número de folhas verdadeiras, massa fresca e seca das raízes. Trabalhando com a cultura do espinafre, Milla et al. (2013) observaram aumento na biomassa,

tamanho de raiz, largura das folhas e tamanho das hastes com a aplicação de carvão de casca de arroz.

Em cultivo de arroz, Major et al. (2005) obtiveram aumento de 53% na biomassa após a adição de carbono na forma de carvão pirogênico. Enquanto que Steiner et al. (2007) observaram que a produtividade de arroz duplicou quando se aplicou carvão vegetal junto com fertilizante. A aplicação de carvão de palha de arroz promoveu efeito positivo na produtividade de arroz e trigo em casa de vegetação, seguido de efeito positivo na absorção de N, P, K, Ca e Mg pelas plantas, devido principalmente a disponibilidade de P, K, Ca e Mg dos solos incorporados com carvão (Zhao et al., 2014).

## **2.9 Carvão pirogênico – sequestro de carbono**

As atividades agropecuárias (cultivos, criações de animais, beneficiamento, processamento, etc.) geram resíduos agrícolas que podem ser aproveitados como insumos para a agricultura ou se tornar potenciais problemas ambientais. Nesse aspecto, uma alternativa é sua utilização para produzir carvão pirogênico e usá-lo no sequestro de carbono e como condicionador orgânico de solo. Para isso, o carvão deve apresentar estrutura interna inerte, semelhante a grafite, que faz preservar (sequestrar) o carbono no solo por centenas e até milhares de anos, e estrutura periférica (externa) reativa (funcionalizada) para atuar de forma semelhante à matéria orgânica natural do ambiente (Rezende et al., 2011).

O sequestro de carbono nos solos agrícolas tem sido considerado uma opção interessante, graças à vasta quantidade de carbono que pode potencialmente ser armazenada nos solos. Nesse sentido, mudanças nas práticas agrícolas, melhoria nas rotações de culturas, aplicação de resíduos orgânicos (composto, resíduos agrícolas, estrumes) oferecem a possibilidade de aumentar o conteúdo de carbono orgânico no solo devido ao aumento dos inputs de carbono e da redução das taxas de decomposição (Mesa et al., 2003).

A hipótese de aumento no sequestro de carbono no solo pelo carvão pirogênico foi comprovada por Jeffery et al. (2011), as quais observaram que de 10 a 20% do componente solúvel do material é mineralizado para CO<sub>2</sub>, mas que compostos aromáticos e alifáticos podem formar moléculas mais complexas e assim aumentar sua resistência à decomposição microbiana. Aumento nos estoques de carbono do solo também foi observado por Vaccari et al. (2011) com aplicação de carvão pirogênico até doses acima de 60 t ha<sup>-1</sup>.

Em experimento em casa de vegetação, Zhao et al. (2014) avaliaram os efeitos da aplicação de carvão de palha de arroz em solo no sequestro de C e emissão de gases de efeito

estufa. Os autores observaram que as mais baixas emissões de CH<sub>4</sub> foram observadas no tratamento com carvão, comparado ao tratamento controle e ao tratamento com palha de arroz in natura, mesmo o carvão trazendo mais C ao solo. Já as emissões de N<sub>2</sub>O foram similares entre o tratamento controle e o tratamento com carvão.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Localização e área experimental**

O trabalho, desenvolvido no período compreendido entre março de 2013 a março de 2014, foi constituído por dois cultivos de feijão-caupi, o primeiro destinado à produção de grãos secos e o segundo, à produção de grãos verdes. Os dois cultivos foram submetidos à mesma metodologia e tratamentos, sendo, ambos, realizados na casa de vegetação do Laboratório de Análises de Solo, Água e Planta (LASAP), Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), localizada no município de Mossoró-RN. As coordenadas geográficas do local são 5° 11' de latitude ao sul e 37° 20' de longitude a oeste de Greenwich, e altitude de 18 m.

O clima local é semiárido e, de acordo com a classificação de Köeppen, é do tipo BSw<sup>h</sup>, portanto, seco e muito quente, com duas estações climáticas definidas: uma seca, que vai de junho a janeiro, e uma chuvosa, de fevereiro a maio (Carmo Filho et al., 1991).

#### **3.2 Caracterização do solo e da água de irrigação**

As amostras de solos utilizadas foram coletadas de cinco tipos de solos representativos da região oeste do Rio Grande do Norte, classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013). O Cambissolo (CS) foi coletado no Assentamento Milagres, Apodi-RN (5°35' S e 37°54' O); o Argissolo (AS), coletado no Campus da UFERSA, Mossoró-RN (5°12' S e 37°19' O); o Latossolo (LS), coletado na Agrovila Brasília, Serra do Mel-RN (5°10' S e 37°0' O); o Neossolo Flúvico (NFS), coletado na Comunidade de Reforma, Apodi-RN (5°40' S e 37°44' O) e o Neossolo Quartzarênico (NQS), coletado na Fazenda Agrícola Famosa, Icapuí-CE (4°53' S e 37°19' O).

As amostras de solo utilizadas em ambos os experimentos foram coletadas do horizonte superficial, na profundidade de 0-20 cm. Após a coleta, foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha de 2 mm de abertura para a caracterização física e química e 4 mm para a montagem do experimento. Na Tabela 1 apresenta-se a

caracterização química e física dos solos utilizados no experimento, conforme metodologias da EMBRAPA (1999), as quais estão descritas na seção Determinações deste Material e Métodos.

Tabela 1 – Características químicas e físicas dos solos utilizados nos experimentos em mistura com carvão vegetal. Mossoró-RN, 2013.

Características químicas									
Solo	pH em água	MOS %	P	K	Na	Ca	Mg	(H+Al)	CTC
			-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			
AS	5,2	0,6	31,2	65,3	14,0	1,0	0,7	1,3	3,23
CS	6,7	1,0	26,9	127,2	3,7	4,2	0,7	0,3	5,57
LS	4,9	0,7	19,7	35,7	7,6	0,4	0,5	3,7	4,73
NFS	6,1	1,6	33,7	165,2	131,5	12,1	6,2	1,4	20,65
NQS	5,1	0,6	26,8	21,3	4,4	0,6	0,7	2,4	3,78
		Cu	Mn		Zn		Fe		
-----mg kg <sup>-1</sup> -----									
AS		2,0	361,1		27,8		182,6		
CS		5,7	464,0		22,7		23,5		
LS		0,2	62,5		17,1		345,4		
NFS		7,6	478,5		34,3		353,0		
NQS		3,9	63,8		31,5		162,0		
Características físicas									
		Densidade de partícula	Densidade do solo	Argila	Areia grossa	Areia fina	Silte	Classe textural	
		---g cm <sup>-3</sup> ---		-----%-----					
AS		2,51	1,25	4	64	26	6	Arenosa	
CS		2,54	1,38	17	53	24	6	Média	
LS		2,56	1,64	6	75	18	1	Arenosa	
NFS		2,40	1,10	30	7	10	53	Siltosa	
NQS		2,48	1,26	2	67	28	3	Arenosa	

Argissolo (AS); Cambissolo (CS); Latossolo (LS); Neossolo Flúvico (NFS); Neossolo Quartzarênico (NQS); Matéria Orgânica do solo (MOS); Capacidade de troca de cátions (CTC).

A água utilizada no experimento foi obtida da rede pública de abastecimento, tendo sido analisada para fins de caracterização: pH = 7,6; condutividade elétrica (CE) = 0,54 dS m<sup>-1</sup>; Dureza = 80,0 mg L<sup>-1</sup>; relação de adsorção de sódio (RAS) = 5,0 (mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>)<sup>0,5</sup>; Ca = 1,0 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>; Mg = 0,6 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>; Na = 4,48 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>; K = 0,25 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>; Cl = 3,4 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>; CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> = 0,4 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> = 2,7 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>). As análises foram realizadas conforme a metodologia proposta por Richards (1954).

### 3.3 Produção de carvão vegetal

A matéria-prima para a produção do carvão vegetal foi originada de resíduos da poda de cajueiro (*Anacardium occidentale* L.), disponível na região do oeste potiguar. A carbonização foi realizada por método artesanal, em forno de terra (caieira), consistindo de vala aberta no chão onde foi colocada a lenha, em seguida foi recoberta com terra e queimada de forma lenta, havendo aberturas para a entrada de ar e para a saída dos gases produzidos. O carvão vegetal obtido foi triturado e passado em peneira de 4 mm, para garantir a homogeneização e elevar a área específica, potencializando a reação com o solo. Posteriormente, foi avaliada a composição do carvão vegetal (Figura 1).



Figura 1 – Preparação do carvão vegetal: forno de terra com os resíduos de poda de cajueiro (A), fechamento do forno (B), processo de carbonização (C), processo de resfriamento do material carbonizado (D), carvão vegetal após carbonização (E) e carvão vegetal triturado e peneirado (F). UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

No Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFRN foram determinados os teores de cinza, umidade e materiais voláteis e, por diferença, o teor de carbono fixo, segundo as metodologias descritas por Pimenta et al. (2009) & Figueiredo (2011), e no Laboratório de Análises de Solo, Água e Planta (LASAP) da UFERSA, os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe) e zinco (Zn), destacados na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização do carvão vegetal utilizado no experimento, obtido de resíduo de poda de cajueiro. Mossoró-RN, 2013.

Principais constituintes						
Umidade	Carbono fixo		Cinzas	Materiais voláteis		
-----%-----						
5,4	63,0		16,0	21,0		
Caracterização química						
N	P	K	Cu	Mn	Fe	Zn
-----g kg <sup>-1</sup> -----			-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
9,35	0,89	1,34	10,21	32,27	185,04	18,45

P (fósforo), K (potássio), Cu (cobre), Mn (manganês), Fe (ferro), Zn (zinco): digestão com ácido nítrico perclórico; N (nitrogênio): digestão com ácido sulfúrico.

### 3.4 Tratamentos e delineamento estatístico

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro doses de carvão vegetal (0; 3,5; 7 e 10,5 t ha<sup>-1</sup>) e cinco tipos de solo (AS, CS, LS, NFS e NQS), em esquema fatorial 4x5, com 5 repetições, totalizando 100 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída por um vaso contendo as misturas de solo e carvão vegetal; os vasos foram dispostos na casa de vegetação espaçados entre si por 0,50 m, constituindo dez linhas e dez colunas, como apresentado na Figura 2.

Os vasos utilizados possuíam capacidade de 15 L e orifícios no fundo para drenagem do excesso de água; em cada um deles foram colocados 10 L de solo misturado com as doses de carvão vegetal. As doses de carvão vegetal foram expressas em toneladas por hectare; considerando que um hectare tem 10.000 m<sup>2</sup>. até a profundidade de 20 cm (0,20 m) teremos 2.000 m<sup>3</sup> ou 2.000.000 L, a partir dos quais foram determinadas as quantidades por vaso correspondentes a 10 L. Os valores utilizados foram 3,5 t ha<sup>-1</sup> (17,5 g por vaso), 7,0 t ha<sup>-1</sup> (35 g por vaso) e 10,5 t ha<sup>-1</sup> (52,5 g por vaso), além do tratamento sem aplicação de carvão vegetal (dose zero). As doses foram escolhidas entre as menores testadas em trabalhos anteriores com efeitos significativos (Sohi et al., 2010; Jeffery et al., 2011).

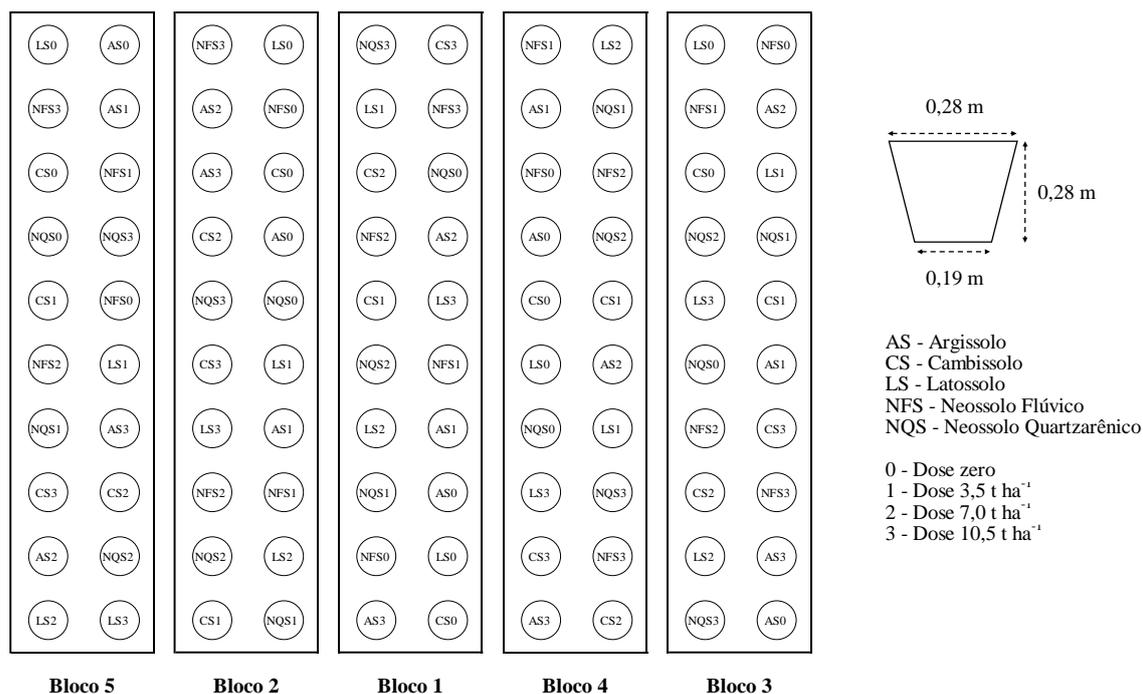


Figura 2 – Disposição dos vasos com as misturas de cinco tipos de solo e doses de carvão vegetal em delineamento experimental com cinco blocos. Mossoró-RN, 2013.

### 3.5 Condução do experimento

As misturas de solo e carvão vegetal foram realizadas no dia 26 de abril de 2013. Antes da semeadura da cultura, os vasos foram deixados na casa de vegetação, com umidade mantida na capacidade de campo por 30 dias, com o intuito de se obter maior reação do carvão vegetal com o solo e de realizar as determinações de retenção de água nos vasos.

#### 3.5.1 Cultivos

O primeiro cultivo foi destinado à produção de grãos secos. A cultivar utilizada, devido à disponibilidade e ser recomendada para a região Nordeste do Brasil, foi a BRS Potengi, de porte semiereto vigoroso, grãos de cor branca com tegumento liso e ciclo de 70-75 dias (EMBRAPA, 2009). A semeadura ocorreu no dia 27 de maio de 2013, colocando-se 15

sementes por vaso a uma profundidade de aproximadamente 0,02 m, quantidade destinada a possibilitar avaliações de crescimento inicial das plantas. Não foi realizada nenhuma adubação química ou orgânica.

O desbaste foi realizado aos 15 dias após a emergência (DAE), deixando-se as três plantas mais vigorosas em cada vaso. A eliminação manual de ervas daninhas foi realizada periodicamente, principalmente durante os primeiros 11 DAE (Freitas et al., 2009). Durante o ciclo da cultura houve a ocorrência da mosca branca (*Bemisia argentifolii*) e do pulgão (*Aphis spp.*), ocasionando sintomas da "fumagina" (*Capnodium spp.*). O controle de pragas foi realizado por pulverização com detergente neutro na proporção de 5 ml por litro de água, ou com extrato aquoso de nim (*Azadirachta indica*) na proporção de 10 ml por litro de água. A colheita foi realizada manualmente, em cada parcela, quando 50% das vagens apresentavam coloração palha.

O manejo da irrigação foi realizado determinando-se a demanda evapotranspirométrica da cultura, pelo método do mini-tanque evaporímetro (Farias et al., 1994; Salomão, 2012), conduzido de forma semelhante à metodologia do Tanque Classe A, já difundida na agricultura irrigada. Para isso, foi usado um tanque cilíndrico de plástico transparente com dimensões de 0,20 m de diâmetro e 0,24 m de profundidade; instalado sobre suporte e posicionado entre os vasos 1,0 m acima do solo, para evitar trocas energéticas com o solo (Figura 3).



Figura 3 – Tanque evaporímetro posicionado entre as parcelas experimentais (A) e ampliação do tanque com as bordas de leitura (B). UFERSA, Mossoró-RN, 2013

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi obtida a partir da evaporação média da água contida no tanque evaporímetro. Para isso, o tanque era preenchido com água até a altura de 4 cm abaixo da borda (nível inicial), para permitir que as leituras pudessem ser efetuadas com maior precisão (Salomão, 2012). As leituras eram realizadas a cada dois dias, medindo-se

a altura desde a borda até o nível de água no momento da leitura, com o auxílio de uma trena graduada em milímetros, repondo para o nível inicial a quantidade de água evaporada.

Depois de estimada a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), era calculada a evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), obtendo-se assim a quantidade de água consumida pela cultura, que foi a base para o cálculo da lâmina de água que foi repostada pela irrigação.

As equações utilizadas nos cálculos são as seguintes:

$$ET_o = E_{vt} \times K_t$$

Em que:

ET<sub>o</sub> - evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>);

E<sub>vt</sub> - evaporação da água observada no tanque evaporímetro (mm dia<sup>-1</sup>);

K<sub>t</sub> - coeficiente do tanque (adimensional).

$$ET_c = ET_o \times K_c \times A$$

Em que:

ET<sub>c</sub> - evapotranspiração da cultura (mm dia<sup>-1</sup>);

ET<sub>o</sub> - evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>);

K<sub>c</sub> - coeficiente da cultura (adimensional);

A - área do tanque volumétrico (0,04 m<sup>2</sup>).

O coeficiente de tanque K<sub>t</sub> adotado é recomendado para casa de vegetação e igual a 1,0. Os coeficientes de cultura utilizados foram adaptados por Souza et al. (2005) e Bastos et al. (2008) e variavam de acordo com a fase da cultura (0,50: de 0 a 10 DAE; 0,75: de 11 a 25 DAE; 1,00: de 26 a 35 DAE; 1,30: de 36 a 45 DAE e 1,00: após 45 DAE).

O segundo cultivo de feijão-caupi foi realizado nos mesmos vasos, mantendo a constituição dos tratamentos aplicada no primeiro cultivo, com o propósito de avaliar o efeito residual dos tratamentos. A cultivar utilizada, disponível na época do plantio e recomendada para a região Nordeste do Brasil, foi a BRS Guariba, que possui grãos com tegumento branco, apresenta crescimento indeterminado e ramos relativamente curtos (EMBRAPA, 2004). A semeadura ocorreu no dia 26 de setembro de 2013, a uma profundidade de aproximadamente 0,02 m, colocando-se 12 sementes por vaso. Aos 15 DAE foi realizado o desbaste, deixando-se as três plantas mais vigorosas em cada vaso. Não foi realizada nenhuma adubação química ou orgânica.

O controle de plantas daninhas e pragas, como também o manejo da irrigação, foram realizados de maneira semelhante ao primeiro cultivo. A colheita foi realizada manualmente,

iniciando no dia 17 de novembro de 2013, sendo as vagens colhidas parceladamente, devido a maturação desuniforme, à medida que atingia o “ponto de feijão-verde”, quando começavam a mudar a coloração verde para a amarela, apresentando-se tenras e firmes. Segundo Sousa et al. (2015), o feijão verde corresponde à fase em que as vagens do feijão-caupi estão próximas da maturação, quando elas param de acumular fotossintatos e os grãos verdes apresentam umidade em torno de 60 a 70%.

### **3.6. Determinações realizadas**

#### **3.6.1 Características físicas dos solos**

A caracterização dos solos utilizados no experimento incluiu as seguintes características: o teor de argila foi determinado pelo método da pipeta após a dispersão do solo por agitação mecânica e química com NaOH, a areia por tamisação e o silte pela diferença; a densidade de partícula foi determinada pelo método do balão volumétrico; o diagrama triangular simplificado (EMBRAPA, 1999) foi utilizada para identificar a classe textural dos solos; a densidade inicial do solo foi determinada logo após o enchimento dos vasos pela massa de solo seco em volume de 10 L.

A capacidade de retenção de água nos vasos (CRA) foi determinada em procedimento adaptado de Casaroli & Van Lier (2008) e Kammann et al. (2011), o qual foi repetido quatro vezes, semanalmente, nos trinta dias posteriores à mistura do carvão vegetal e solo nos vasos. Inicialmente, foi efetuada a pesagem dos vasos com o solo seco em balança para 20 kg com precisão de 5 g; em seguida, os vasos foram colocados por 24 horas para saturar (por capilaridade) em caixa d'água com nível água equivalente a 2/3 da altura do solo nos vasos; logo após, os vasos foram cobertos com lona plástica para minimizar a evaporação de água e deixados para drenar livremente por outras 24 horas; ao final, os vasos foram pesados, obtendo-se a massa do solo saturado. A CRA nos vasos foi determinada com os dados de volume de água retida e volume de solo contido nos vasos e expressa em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

A densidade final do solo foi determinada após o segundo experimento (220 dias após a implantação), pelo método do anel volumétrico. As amostras indeformadas de solo foram coletadas com auxílio de um cilindro (anel) de aço-inox com capacidade volumétrica de 50

cm<sup>3</sup>. O solo de cada anel foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 105°C por 24 h. Após esse período as amostras foram pesadas para determinar a massa seca do solo. Com os valores já conhecidos, realizou-se o cálculo de densidade do solo para cada amostra, conforme a seguinte equação:

$$D_s = M_s/V_s$$

Em que:

$D_s$  - densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>);

$M_s$  - massa do solo seco (g);

$V_s$  - volume do anel (cm<sup>3</sup>).

### 3.6.2 Características químicas dos solos

As análises químicas realizadas para caracterização dos solos (antes do primeiro cultivo do feijão-caupi) e ao final do experimento (após o segundo cultivo) se referem a amostras de solo coletadas na profundidade de 0-0,20 m, seja dos solos em seu local de coleta, seja nos vasos, para avaliar o efeito dos tratamentos, após o segundo experimento. Posteriormente, as amostras foram secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm e analisadas quanto ao pH em água, CE<sub>1:2,5</sub>, MO, P, K, Ca, Mg, Na, tendo sido calculadas SB, CTC e PST (EMBRAPA, 1999).

O pH do solo foi determinado potenciométricamente por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo-água na proporção de 1:2,5; a matéria orgânica determinada a partir do carbono orgânico do solo, determinado por reação de oxidação via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico e titulação com sulfato ferroso amoniacal; os cátions trocáveis Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> foram extraídos com solução de KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica, enquanto que K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> e P foram extraídos através de solução de Mehlich<sup>-1</sup> (HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup>), sendo K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup> quantificados por espectrofotometria de chama e P por colorimetria; a acidez potencial (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>) foi extraída com solução tamponada de acetato de cálcio e quantificada por titulação com NaOH; a soma de bases (SB) foi obtida pela soma dos teores de cátions trocáveis (Ca + Mg + K + Na); a capacidade de troca catiônica (CTC) foi calculada pela soma: SB + (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>); a percentagem de sódio trocável (PST) foi calculada pela equação: (Na/CTC) x 100; os micronutrientes Cu, Zn, Fe e Mn foram extraídos por digestão via úmida nitroperclórica e determinados por espectrofotometria de absorção atômica.

### 3.6.3 Crescimento inicial das plantas

As seguintes determinações de crescimento inicial foram realizadas em 12 plântulas do feijão-caupi, com o intuito de deixar as restantes para avaliação da produção, aos 15 dias após a semeadura do primeiro cultivo: porcentagem de emergência de plântulas (%E), considerada o número de plântulas que apresentavam os cotilédones completamente acima do nível do solo; altura das plântulas (ALT), determinada com auxílio de uma régua graduada em milímetros, medindo-se do colo da planta até a gema apical; massa seca da parte aérea (MSP), quando as plântulas foram cortadas rente ao solo e levadas à estufa de circulação forçada de ar, com temperatura de 65°C, até atingir massa constante, e depois foram pesadas em balança analítica com precisão 0,001g, tendo a massa seca total dos vasos sido dividida pelo número de plântulas no vaso.

### 3.6.4 Componentes de produção

As avaliações foram executadas por ocasião das colheitas de cada cultivo do feijão caupi. Os grãos foram colhidos, debulhados manualmente e as sementes limpas com auxílio de peneiras. As variáveis de produção avaliadas nas três plantas restantes em cada unidade experimental (vaso) foram as seguintes: número de grãos por vagem (NGV); comprimento médio de vagem (CMV) - obtido através da média do comprimento das vagens contidas em todas as plantas coletadas por vaso; massa de 100 grãos (P100G) e a produtividade dos grãos secos (PROD) no primeiro cultivo, estimada pela pesagem dos grãos secos obtidos das plantas de cada unidade experimental e transformada de  $\text{g vaso}^{-1}$  [área da circunferência do vaso ( $0,05 \text{ m}^2$ )] para  $\text{kg ha}^{-1}$ , e posteriormente corrigida a umidade dos grãos para 13%.

No segundo cultivo foram determinados: número de grãos por vagem verde (NGV); comprimento médio de vagem verde (CMV); massa de 100 grãos verdes (P100G) e produtividade de grãos verdes (PROD), expressa em  $\text{kg ha}^{-1}$ .

### **3.7 Análises estatísticas**

Os dados foram submetidos à análise de variância, aplicando-se o Teste F a 5% de probabilidade, para verificar o efeito significativo, ou não, de cada fator e da interação entre eles sobre as variáveis avaliadas. Para o fator qualitativo, foi aplicado o Teste Tukey a 5% de probabilidade, através do programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2007). Para o fator quantitativo foi realizada a análise de regressão, escolhendo-se, entre os modelos linear e quadrático, o modelo de melhor ajuste conforme o nível de significância e o de maior coeficiente de determinação. Quando houve efeito significativo da interação entre os fatores sobre as variáveis estudadas foi realizado o desdobramento dos fatores, realizando a análise da variância de cada nível de um fator em função dos níveis do outro fator. Ressaltando que os dados de cada cultivo foram avaliados individualmente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Características físicas do solo

Os fatores isolados solo e dose exerceram efeito significativo sobre a CRA nos vasos, analisada antes do primeiro experimento, ao nível de 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, sem haver efeito significativo da interação entre estes fatores. Enquanto isso, além do efeito do tipo de solo, a densidade do solo recebeu efeito significativo da interação entre doses de carvão vegetal, ao final do segundo experimento (Tabela 3).

Tabela 3 – Resumo da análise de variância para capacidade de retenção de água (CRA) e densidade do solo (Ds) em função de doses de carvão vegetal aplicadas em cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

Fonte de variação	GL	QUADRADO MÉDIO	
		CRA	Ds
Solo	4	0,0233 <sup>**</sup>	0,0871 <sup>**</sup>
Dose	3	0,0016 <sup>*</sup>	0,0070 <sup>ns</sup>
Solo x Dose	12	0,0004 <sup>ns</sup>	0,0105 <sup>**</sup>
Resíduo	76	0,0005	0,0062
CV (%)	-	15,86	4,23

<sup>\*\*</sup>, <sup>\*</sup> e <sup>ns</sup>: significativos a 1% e 5% de probabilidade e não significativo pelo Teste F, respectivamente. GL: grau de liberdade; CV: coeficiente de variação.

#### 4.1.1 Capacidade de retenção de água no solo (CRA)

A CRA nos vasos, após a aplicação do carvão vegetal, foi superior nos solos AS e NQS em relação aos solos NFS, LS e CS, que não diferiram entre si (Tabela 4). Apesar de, neste trabalho, não ter havido interação entre dose de carvão vegetal e tipo de solo, Karhu et al. (2011) afirmam que o aumento na retenção de água sob efeito do carvão vegetal depende da textura do solo. Aumentos na retenção de água pelo solo são variáveis entre tipos de solos e de carvão, segundo Streubel et al. (2011), que obtiveram aumento de 13,7% na retenção de água na tensão de 0,1 MPa, com dose de 39 t ha<sup>-1</sup>.

O fato de que os solos AS e NQS possuem teores de areia muito altos confirma hipóteses de que a aplicação de carvão vegetal promove maior benefício em solos mais arenosos, suprimindo a disponibilidade de água limitada destes solos (Glaser et al., 2002; Sohi et al., 2010; Peake et al., 2014). Além da CRA de solo arenoso ser limitada pela sua pequena

superfície específica (Troeh & Thompson, 2005), Downie et al. (2009) sugerem que, devido a maior retenção de água ocorrer em microporos, abundantes no carvão vegetal e raros em solos arenosos, a adição de carvão beneficia mais a retenção de água em solos arenosos. Os teores de silte e de matéria orgânica no NFS são muito superiores aos dos outros solos (Tabela 1); isto explicaria sua menor CRA em relação a NQS e AS. Segundo Peake et al. (2014), em solo com alto teor de silte, o efeito da aplicação de carvão vegetal sobre a CRA é negativo. Além disso, relatam que os efeitos do carvão sobre densidade do solo e retenção de água são muito semelhantes ao efeito da MOS, sendo possível que nos solos com maiores teores de MOS a resposta à aplicação de carvão seja menor.

Tabela 4 – Valores médios de capacidade de retenção de água nos vasos (CRA) após a aplicação de carvão vegetal em cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

SOLO	Capacidade de retenção de água (cm <sup>-3</sup> cm <sup>-3</sup> )
Argissolo	0,174 a
Neossolo Quartzarênico	0,168 a
Cambissolo	0,113 b
Neossolo Flúvico	0,110 b
Latossolo	0,103 b

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

Em resultados encontrados por Peake et al. (2014), foi verificada interação significativa entre tipo de solo e dose de carvão em relação a retenção de água. Em muitos estudos no qual o efeito de carvão pirogênico na produtividade das culturas foi avaliado, a retenção de água no solo é citada como um fator chave nos resultados (Sohi et al., 2010). Após a aplicação de carvão vegetal em oito tipos de solos, Peake et al. (2014) observaram que benefícios sobre densidade do solo e CRA aumentaram com a dose aplicada, sendo que aplicações médias (20 t ha<sup>-1</sup>) e altas (100 t ha<sup>-1</sup>) aumentaram a CRA no solo em até 22% e diminuíram a densidade em até 15%.

A presença de carvão pirogênico pode contribuir para mudanças significativas em propriedades físicas do solo, tais como: textura, estrutura e agregação, porosidade, diâmetro dos poros, distribuição granulométrica e densidade (Downie et al., 2009). De acordo com Esmaeelnejad et al. (2016), diferentes matérias primas, condições de carbonização e tamanhos de partículas do carvão pirogênico aplicado podem promover efeitos diferentes nas características físicas e hidrológicas do solo.

As características físicas do carvão pirogênico mais relacionadas à sua CRA são altas porosidade e superfície específica, que exercem efeitos diretos. No carvão vegetal, a

superfície específica é comparável à da argila e superior à da areia de forma que sua aplicação pode aumentar significativamente a CRA do solo. O efeito indireto da aplicação de carvão se dá pela melhoria na agregação do solo (estrutura). Por outro lado, a estrutura aromática do carvão pirogênico, que tem características hidrofóbicas, pode reduzir a penetração de água nos espaços porosos dos agregados do solo, aumentando assim a estabilidade dos agregados (Glaser et al., 2002; Karhu et al., 2011; Esmaelnejad et al., 2016).

Na Figura 4, observa-se o efeito isolado das doses de carvão vegetal aplicadas no solo, na qual houve um aumento linear na CRA na média de todos os solos, sendo que, em relação à dose zero, o valor máximo obtido, de  $0,14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , significa um aumento médio de 17% na CRA. Sendo essa mais uma evidência positiva do carvão vegetal sobre a melhoria desta característica física do solo, podendo, desta forma, promover maior disponibilidade de água para as plantas.

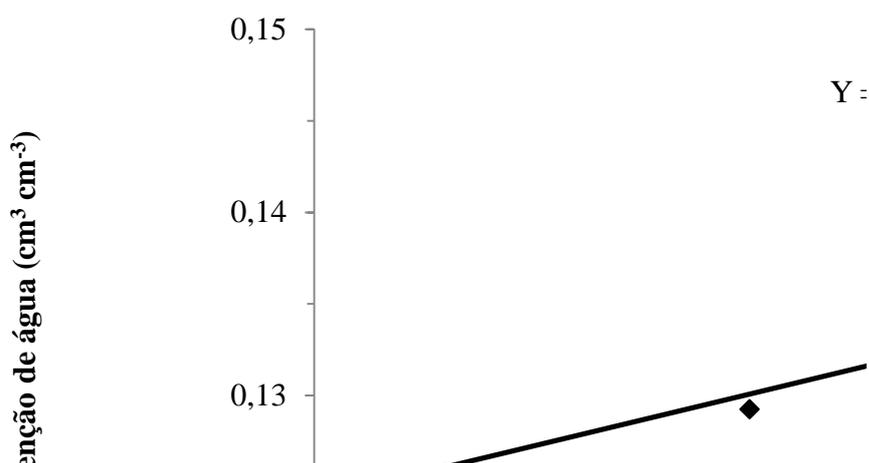


Figura 4 – Capacidade de retenção de água em vasos sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

Resultados semelhantes foram encontrados por Carvalho et al. (2014), que avaliaram doses de carvão vegetal sob a CRA em vasos e verificaram aumento de 39% entre o tratamento com a dose zero e a maior dose ( $10,5 \text{ t ha}^{-1}$ ); Dugan et al. (2010), testando doses de 5, 10 e  $15 \text{ t ha}^{-1}$  de carvão pirogênico em três solos, também observaram que, em relação à dose zero, todas as doses promoveram aumento na retenção de água, o qual dependeu do tipo de solo e da matéria prima do carvão; enquanto que Liang et al. (2014) observaram que a aplicação de  $90 \text{ t ha}^{-1}$  de carvão vegetal proporcionou aumento na CRA e redução na densidade do solo, três anos após a aplicação do carvão.

#### 4.1.2 Densidade do solo

Ao final dos experimentos, quando se analisou o efeito das doses de carvão vegetal sobre a densidade de cada solo estudado, verificou-se efeito significativo apenas nos solos CS, LS e NFS (Figura 5). O comportamento da densidade do solo em função da dose foi quadrático nos três solos, sendo que no CS a densidade do solo diminuiu para todas as doses enquanto no LS foi observado um ponto de mínima densidade na dose de 7,7 t ha<sup>-1</sup>, com diferença muito pequena da dose máxima (10,5 t ha<sup>-1</sup>), indicando que o carvão vegetal influenciou a macroporosidade, devido à presença das partículas finas de carvão, elevando a microporosidade e, conseqüentemente, melhorando a retenção de água.

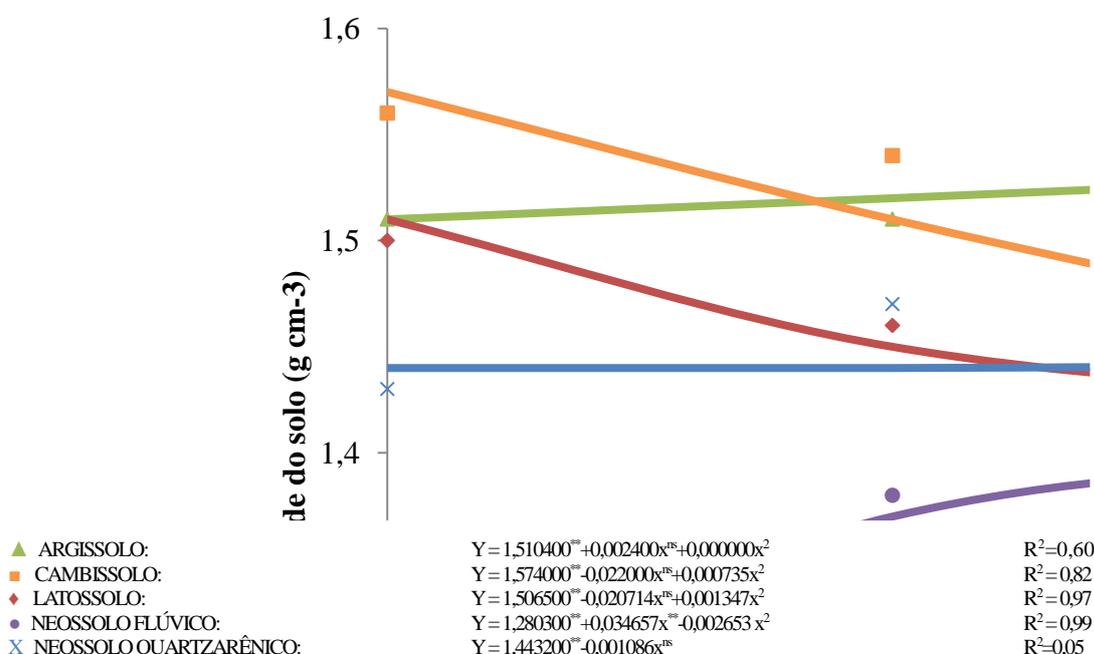


Figura 5 – Densidade de solo sob doses de carvão vegetal aplicadas em cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

De modo geral, o NFS apresentou valores médios de densidade do solo inferiores aos demais solos, independentemente da dose de carvão vegetal aplicada, não oferecendo riscos maiores de restrição ao crescimento das raízes. Pode-se também observar, na Figura 3, aumento na densidade do solo com o incremento das doses aplicadas, atingindo ponto de máxima na dose de 6,5 t ha<sup>-1</sup>, o que pode não estar relacionado com o efeito sob a estrutura do solo, e sim ser causado pelo entupimento de poros maiores no solo, resultando em diminuição da infiltração e da retenção de água no solo.

Esses resultados confirmam os obtidos por autores como Peake et al. (2014), os quais

observaram que a aplicação de carvão vegetal promoveu redução, com intensidades variáveis, na densidade de todos os solos por eles estudados. A partir de um decréscimo médio de 3,3% na densidade do solo quando se aplicou a menor dose de carvão (4 t ha<sup>-1</sup>), os autores obtiveram redução de 3,7%, quando a dose aumentou para 20 t ha<sup>-1</sup>, e de 10,2% com a maior dose (100 t ha<sup>-1</sup>). Enquanto que Esmaelnejad et al. (2016), 180 dias após a aplicação de carvão vegetal a 2% base massa, observaram redução na densidade do solo em todos os tratamentos, dos 1,65 g cm<sup>-3</sup>, da testemunha, para valores entre 1,45 e 1,55 g cm<sup>-3</sup> em.

A incorporação de carvão vegetal pode aumentar o volume de solo e reduzir sua densidade, isto se deve, além dos efeitos da aplicação de carvão sobre porosidade e agregação do solo, às propriedades físicas do carvão vegetal, em particular sua porosidade, sendo efeito direto da baixa densidade do carvão, cerca de 0,30 g cm<sup>-3</sup>, comparado à densidade de um solo típico, de 1,30 g cm<sup>-3</sup>. Os carvões vegetais oriundos de material herbáceo são os que apresentam menor densidade (Peake et al., 2014; Esmaelnejad et al., 2016).

#### 4.2 Avaliação do crescimento inicial do feijão-caupi

Todas as variáveis de crescimento inicial do feijão-caupi cultivar Potengi, no primeiro cultivo, foram influenciadas significativamente pela aplicação do carvão vegetal, como também pelos solos com características distintas, além da interação entre estes fatores, ao nível de 1% de probabilidade (p<0,01).

Tabela 5 – Resumo da análise de variância para porcentagem de emergência de plântula (%E), altura de plântula (Altura) e massa seca da parte aérea (MSP) de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

Fonte de variação	GL	QUADRADO MÉDIO		
		%E	Altura	MSP
Bloco	4	20,070 <sup>ns</sup>	0,988 <sup>ns</sup>	0,0008 <sup>ns</sup>
Solo	4	2288,864 <sup>**</sup>	7,912 <sup>**</sup>	0,0279 <sup>**</sup>
Dose	3	447,755 <sup>**</sup>	3,661 <sup>**</sup>	0,0159 <sup>**</sup>
Solo x Dose	12	420,387 <sup>**</sup>	6,121 <sup>**</sup>	0,0044 <sup>**</sup>
Resíduo	76	26,004	0,557	0,0002
CV (%)	-	6,80	4,56	5,57

\*\* e <sup>ns</sup> significativo a 1% de probabilidade e não significativo pelo Teste F, respectivamente. GL grau de liberdade; CV coeficiente de variação.

#### 4.2.1 Porcentagem de emergência de plântulas

Os comportamentos dos dados referentes à porcentagem de plântulas emergidas de feijão-caupi estão expostos na Figura 6, podendo-se observar efeito diferenciado dos tipos de solo em função da dose de carvão vegetal. Os solos NQS, LS e CS apresentaram comportamento linear positivo em relação à aplicação das doses. Comportamento diferenciado foi verificado no AS e no NFS, com efeito quadrático. No AS a porcentagem de emergência apresentou ponto de máximo na dose de  $4,8 \text{ t ha}^{-1}$ , enquanto que, no NFS, foi observado ponto de mínima emergência na dose de  $5 \text{ t ha}^{-1}$ , com redução aproximada de 49% em relação à dose zero.

Como se observa na Figura 5, o efeito quadrático da densidade do solo no NFS tem comportamento contrário ao efeito sobre a porcentagem de emergência das plântulas (Figura 6). Provavelmente, a redução na porcentagem de emergência nas menores doses, encontrada no NFS, esteja relacionada à textura siltosa, de modo que as partículas de carvão tenham contribuído para criar uma crosta pouco permeável na superfície, resultado da irrigação diária, mas as maiores quantidades de carvão vegetal tenham revertido esta tendência.

A aplicação do carvão vegetal pode ter beneficiado as condições físicas de superfície na maioria dos solos e, conseqüentemente, ter favorecido a emergência das plântulas em relação aos tratamentos que não receberam carvão vegetal.

Em geral, os resultados observados no AS, NQS, LS e CS indicam que o aumento da dose de carvão vegetal favoreceu a emergência de um maior número de plântulas. Os maiores valores médios de plântulas emergidas em solos de textura mais arenosa podem estar relacionados à menor dificuldade das plântulas em romper a barreira física do solo. A elevada porosidade do carvão vegetal em contato com estes solos pode ter possibilitado condições que permitiram maior CRA no solo e nutrientes, o que propiciou o maior número de plântulas emergidas. É importante destacar que no CS ocorreu o acréscimo mais expressivo na porcentagem de emergência, de 36% entre a dose zero e a maior dose ( $10,5 \text{ t ha}^{-1}$ ). Isto pode indicar que, neste solo, a aplicação de carvão vegetal tenha corrigido algum fator nocivo à emergência das plantas, como a ação de argilas expansivas em criar crosta superficial.

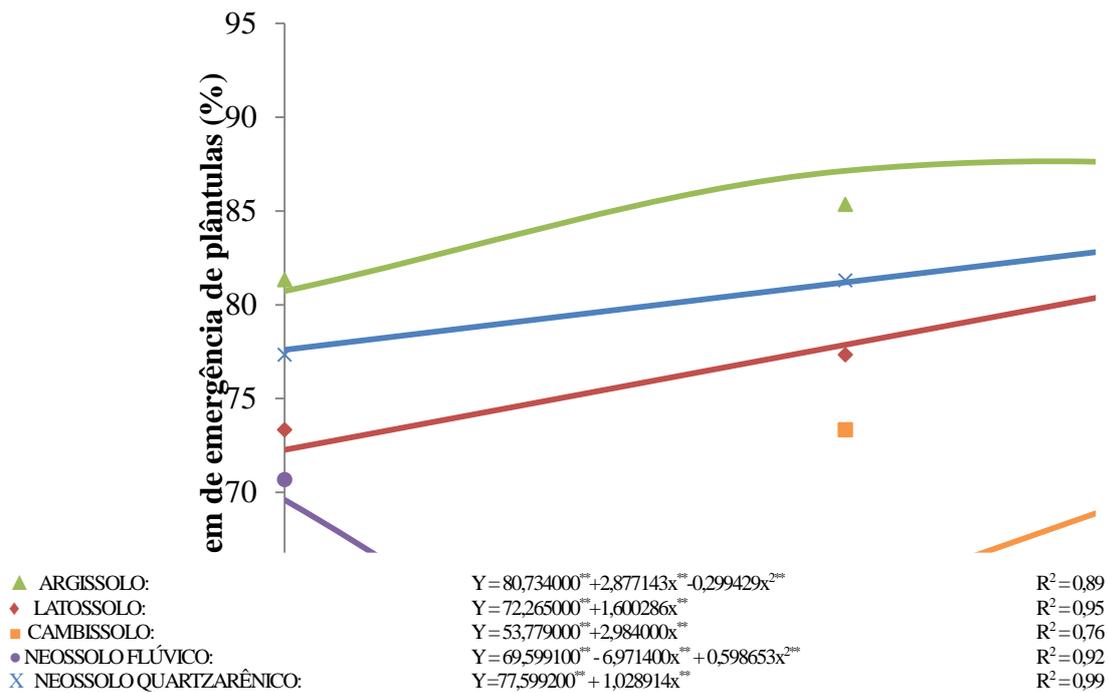


Figura 6 - Porcentagem de emergência de plântulas de feijão-caupi cultivadas sob doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

Resultados semelhantes foram obtidos por Cavalcante et al (2012), avaliando o efeito do carvão vegetal na produção de mudas de maracujazeiro amarelo, quando obtiveram incremento na emergência de plântulas, bem como do índice de velocidade de emergência (IVE), em função da maior quantidade de carvão aplicado.

Em experimento avaliando a utilização de carvão vegetal no crescimento inicial de sete espécies florestais de Zâmbia, Chidumayo (1994) avaliou a taxa de germinação e o crescimento da parte aérea de mudas de *Acacia polyacantha*, *Bauhinia petersiana*, *Isobertinia angolensis*, *Pterocarpus angolensis*, *Swartzia madagascariensis*, *Tamarindus indica* e *Ziziphus mauritiana*, produzidas em solos com e sem carvão vegetal. O efeito da aplicação do carvão foi positivo sobre a germinação das espécies, que aumentou de 0 a 30%, sem carvão vegetal, para 20 a 70%, quando foi aplicado carvão vegetal. Por outro lado, Souchie et al. (2011) não obtiveram efeito do carvão vegetal na germinação de carvoeiro do cerrado (*Tachigali vulgaris*).

#### 4.2.2 Altura de plântulas

Com relação à altura das plântulas do feijão-caupi, o desdobramento da interação entre

dose de carvão vegetal e tipo de solo evidencia um comportamento quadrático no NFS, em função das doses de carvão vegetal, com ponto de mínima altura na dose de 4,8 t ha<sup>-1</sup> (Figura 7). Este comportamento foi muito semelhante ao comportamento da porcentagem de emergência e deve ter as mesmas causas.

Os solos NQS, LS, AS CS apresentaram comportamento linear positivo para a altura de plântulas com o aumento da dose aplicada. Dentre eles, o CS apresentou o aumento mais expressivo, de forma semelhante ao comportamento da porcentagem de emergência, obtendo um incremento no tamanho das plântulas em 35% entre a dose zero e a maior dose.

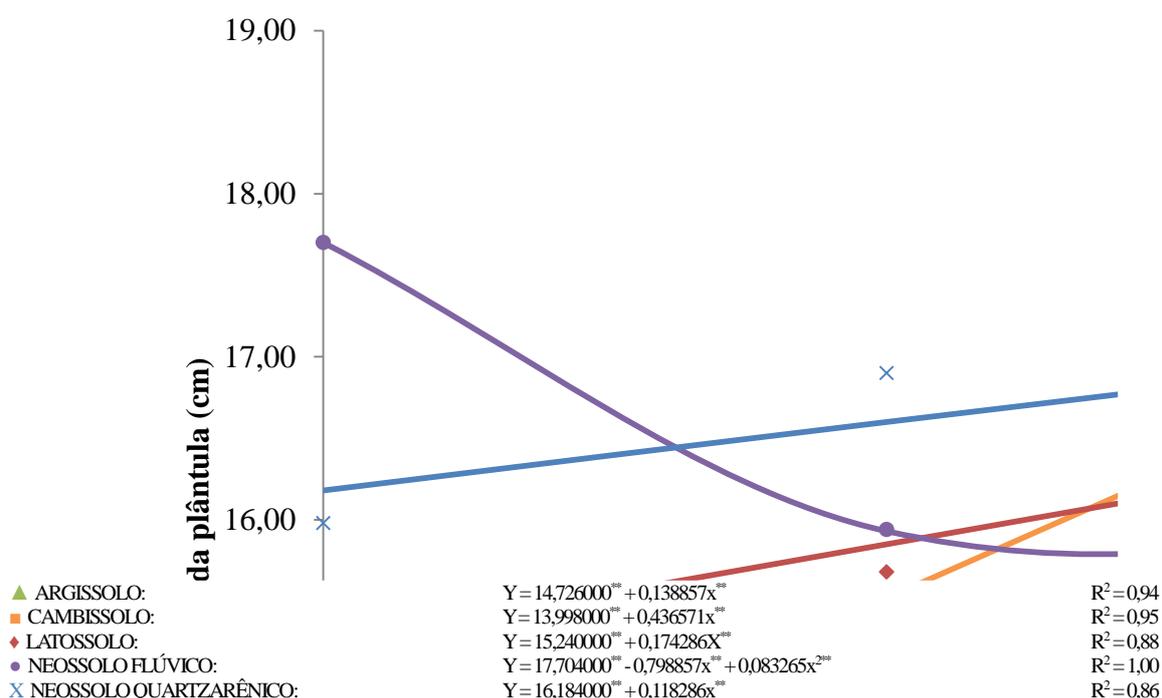


Figura 7 – Altura de plântulas de feijão-caupi cultivadas sob doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

Efeito semelhante foi relatado por Madari et al. (2006), com experimento em vasos, que verificaram que o arroz de terras altas (cultivar Primavera) também respondeu positivamente à aplicação de carvão vegetal, principalmente na fase inicial do desenvolvimento, em que maior efeito foi observado no desenvolvimento do colmo. Esses efeitos podem estar relacionados à adição de nutrientes pelo carvão vegetal, que pode ter resultado em maior quantidade de nutrientes disponíveis para as plantas, que também se beneficiaram de condições físicas favoráveis ao seu desenvolvimento. Petter (2010) também atribuiu a maior altura de plantas, após a aplicação de carvão vegetal, à maior absorção de nutrientes do substrato, principalmente em função das superfícies reativas nas bordas das estruturas aromáticas nos poros do carvão vegetal.

Outra possível explicação, além da adição dos nutrientes normalmente encontrados no carvão vegetal, segundo Novotny et al. (2009), é de que apesar do carvão vegetal ser considerado um material bastante inerte, este possui na sua estrutura molecular sítios capazes de realizar troca iônica, condição singular que pode contribuir para o aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) dos solos e proporcionar maior disponibilidade de nutrientes.

Esse efeito não foi encontrado no trabalho Lira et al. (2013), nos quais observaram que a altura de plantas cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) foi inibida pelas maiores doses de carvão vegetal aplicadas, justamente as doses que proporcionaram maior diâmetro de colmo e maior produção de folhas, conseqüentemente, maior produção de matéria seca por hectare.

Resultados divergentes também foram obtidos por Albano et al. (2011), avaliando o efeito do carvão vegetal sobre a altura de mudas de maracujazeiro amarelo (*Passiflora edulis*) e mamoeiro 'Formosa' (*Carica papaya*). As mudas de mamoeiro apresentaram as maiores alturas nas menores doses de carvão vegetal, enquanto que as mudas de maracujazeiro apresentaram altura linear crescente com o aumento de doses de carvão vegetal.

#### 4.2.3 Massa seca da parte aérea

Ao se desdobrar a interação entre dose de carvão vegetal e tipo de solo sobre a massa seca da parte aérea de feijão-caupi pode-se separar os solos quanto ao comportamento em função das doses aplicadas. Os solos CS, LS e NQS apresentaram comportamento linear positivo da massa seca (Figura 8). Verifica-se novamente que o aumento mais expressivo na produção massa seca (48%) aconteceu no CS, o que pode estar relacionado ao fato de que o carvão vegetal tenha evitado o surgimento de crostas superficiais e/ou tenha reduzido efeitos tóxicos de elementos como o manganês.

Os outros dois solos apresentaram efeito quadrático da massa seca da parte aérea em função da dose de carvão vegetal. O AS apresentou ponto de máxima massa seca na dose de 6,7 t ha<sup>-1</sup>, enquanto que o NFS apresentou ponto de mínima massa seca na dose de 5,1 t ha<sup>-1</sup> (Figura 6). Em geral, a aplicação do carvão vegetal promoveu incrementos na produção de massa seca de feijão-caupi cultivado em distintos solos, fato este que pode estar relacionado à contribuição do carvão para uma maior absorção de nutrientes.

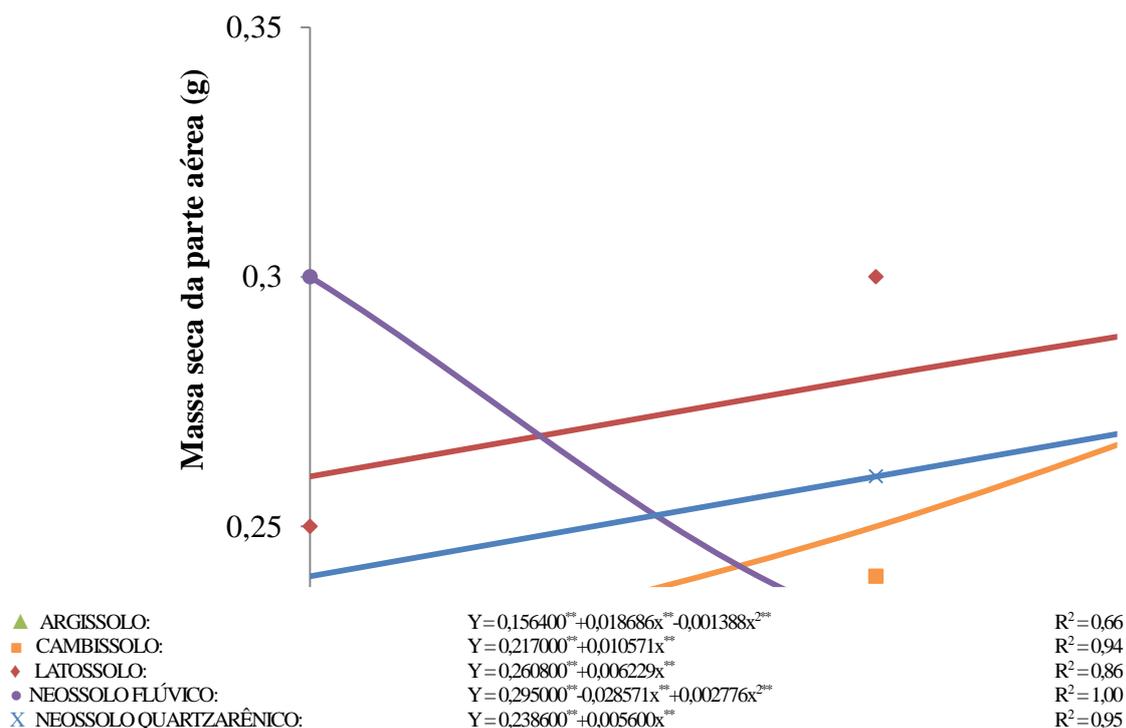


Figura 8 – Massa seca da parte aérea de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

Entre os autores que obtiveram resultados corroborando os obtidos neste estudo, Souchie et al. (2011) verificaram incrementos lineares em massa seca de raiz e parte aérea de *Tachigali vulgaris* (carvoeiro do cerrado) com a adição de doses de até 50% de carvão vegetal; Souza et al. (2006), avaliaram o efeito da aplicação do carvão vegetal em diferentes substratos (esterco, areia+carvão) e observaram incremento de biomassa seca da parte aérea e raízes em mudas de cajuru (*Arrabidaea chica* Verlot.); Major et al. (2005) verificaram que a adição de carvão vegetal aumentou a biomassa de plantas de arroz em 53%; Petter (2010), estudando o efeito do carvão vegetal em solos de cerrado, constatou que as doses de 8 e 16 t ha<sup>-1</sup> de carvão vegetal proporcionaram maiores alturas e massa seca da soja nas épocas avaliadas; Maia & Sohi (2010) constataram que a adição de 30, 24 t de carvão vegetal ao solo ao longo de um ciclo de milho forrageiro resultou em um aumento de 17% na produção de massa seca de milho nas parcelas que receberam o carvão vegetal.

### 4.3 Componentes de produção do feijão-caupi

Verifica-se, na Tabela 6, o efeito da aplicação de doses de carvão vegetal em cinco tipos de solo em dois cultivos sucessivos, sendo o segundo para colheita de feijão verde.

Todas as variáveis de produção, nos dois cultivos, apresentaram efeito significativo ( $p < 0,01$ ) dos fatores isolados dose de carvão vegetal e tipo de solo e da interação entre eles ( $p < 0,01$ ), com exceção do número de grãos por vagem (NGV), que não apresentou efeito significativo da interação no primeiro cultivo. Isto indica que a aplicação de carvão vegetal proporcionou efeito residual significativo no segundo cultivo de feijão-caupi em todos os solos estudados.

Tabela 6 – Resumo da análise de variância para número de grãos por vagem (NGV), comprimento médio da vagem (CMV), massa de 100 grãos (P100G) e produtividade de grãos (PROD) em dois cultivos (1º e 2º) de feijão-caupi sob doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

Fonte de variação	GL	QUADRADO MÉDIO							
		NGV		CMV		P100G		PROD	
		1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º
Bloco	4	0,08 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,36 <sup>n.s</sup>	0,004 <sup>ns</sup>	1,06 <sup>ns</sup>	3600 <sup>ns</sup>	266,4 <sup>ns</sup>
Solo (S)	4	7,64 <sup>**</sup>	6,81 <sup>**</sup>	4,06 <sup>**</sup>	33,38 <sup>**</sup>	45,16 <sup>**</sup>	632,92 <sup>**</sup>	212600 <sup>**</sup>	2584695,3 <sup>**</sup>
Dose (D)	3	16,60 <sup>**</sup>	6,59 <sup>**</sup>	16,40 <sup>**</sup>	13,67 <sup>**</sup>	28,97 <sup>**</sup>	169,70 <sup>**</sup>	481167 <sup>**</sup>	340913,4 <sup>**</sup>
S x D	12	0,36 <sup>ns</sup>	6,76 <sup>**</sup>	0,87 <sup>*</sup>	5,24 <sup>**</sup>	1,86 <sup>**</sup>	180,75 <sup>**</sup>	42000 <sup>**</sup>	192369,1 <sup>**</sup>
Resíduo	76	0,27	0,31	0,44	0,31	0,07	2,46	11179	890,8
CV (%)	-	6,24	6,41	5,11	4,13	1,53	6,47	9,69	3,94

\*\* , \* , <sup>ns</sup> significativo a 1% e 5% de probabilidade e não significativo pelo Teste F, respectivamente. GL grau de liberdade; CV coeficiente de variação.

#### 4.3.1 Número de grãos por vagem

Em relação ao tipo de solo (Tabela 7), observam-se os valores médios do número de grãos por vagem de feijão-caupi cultivado em diferentes solos no primeiro cultivo (cultivar Potengi). As plantas obtiveram os maiores números de grãos por vagem quando foram cultivadas no NFS (9,4), em relação aos demais solos. Uma provável explicação pode estar relacionada ao fato deste solo apresentar características nutricionais favoráveis ao crescimento da cultura, conforme está exposto na Tabela 1.

Tabela 7 – Valores médios de número de grãos por vagem no primeiro cultivo de feijão-caupi cultivado em cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

Solo	Número de Grãos por Vagem
Neossolo Flúvico	9,40 a
Neossolo Quartzarênico	8,20 b
Argissolo	8,05 b
Cambissolo	7,95 b
Latossolo	7,95 b

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

Em relação à dose de carvão vegetal, na média de NGV em todos os solos, a resposta do feijão-caupi no primeiro cultivo foi linear positiva (Figura 9). As médias obtidas no presente trabalho, entre 7,95 e 9,40, representaram aumento de 18% entre o tratamento com a dose zero e a maior dose, superior à encontrada por Silva et al. (2014), que trabalhando com cultivares de feijão-caupi no município de Vitória da Conquista - BA, obteve média de 7,38 grãos por vagem para a cultivar BRS Potengi. Levando em conta que o cultivo se deu sob efeito da aplicação de carvão vegetal, sem nenhuma adubação química, esses resultados se mostraram promissores.

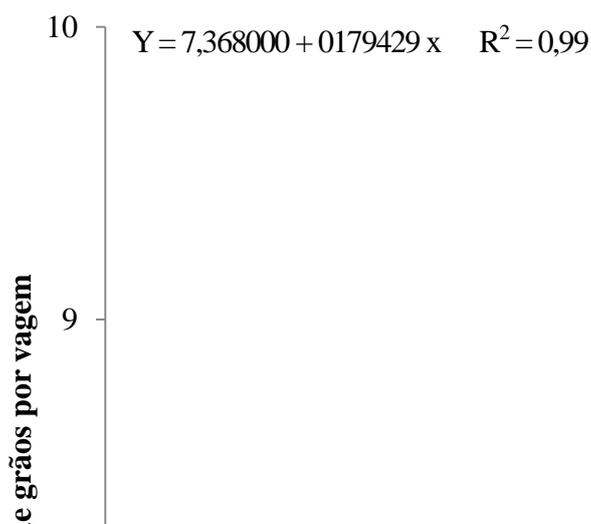


Figura 9 – Número de grãos por vagem no primeiro cultivo de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

No segundo cultivo de feijão-caupi (cultivar Guariba), o desdobramento da interação entre tipo de solo e dose de carvão vegetal para número de grãos verdes por vagem evidencia o comportamento diferenciado dos solos AS e NQS, nos quais o maior NGV ocorreu na dose zero de carvão vegetal (Figura 10). No NQS a redução no NGV foi linear em função da dose aplicada, enquanto que no AS o comportamento foi quadrático, com mínimo NGV na dose de 6,5 t ha<sup>-1</sup>. Nos solos CS, LS e NFS, o aumento em NGV foi linear em função da dose aplicada, tendo sido obtidos 10, 9 e 10 grãos por vagem, respectivamente, na dose de 10,5 t ha<sup>-1</sup>. Destacando-se que o efeito mais expressivo do carvão vegetal ocorreu no CS, no qual ocorreu aumento de 50% em NGV para a maior dose em relação à dose zero.

Os valores de NGV alcançados neste trabalho, avaliados na mesma cultivar (BRS Guariba), foram menores do que os obtidos em dois experimentos, sob sistema de sequeiro e irrigado, em Teresina-PI, com média de 15,15 e 14,60, respectivamente (Sousa et al., 2015)

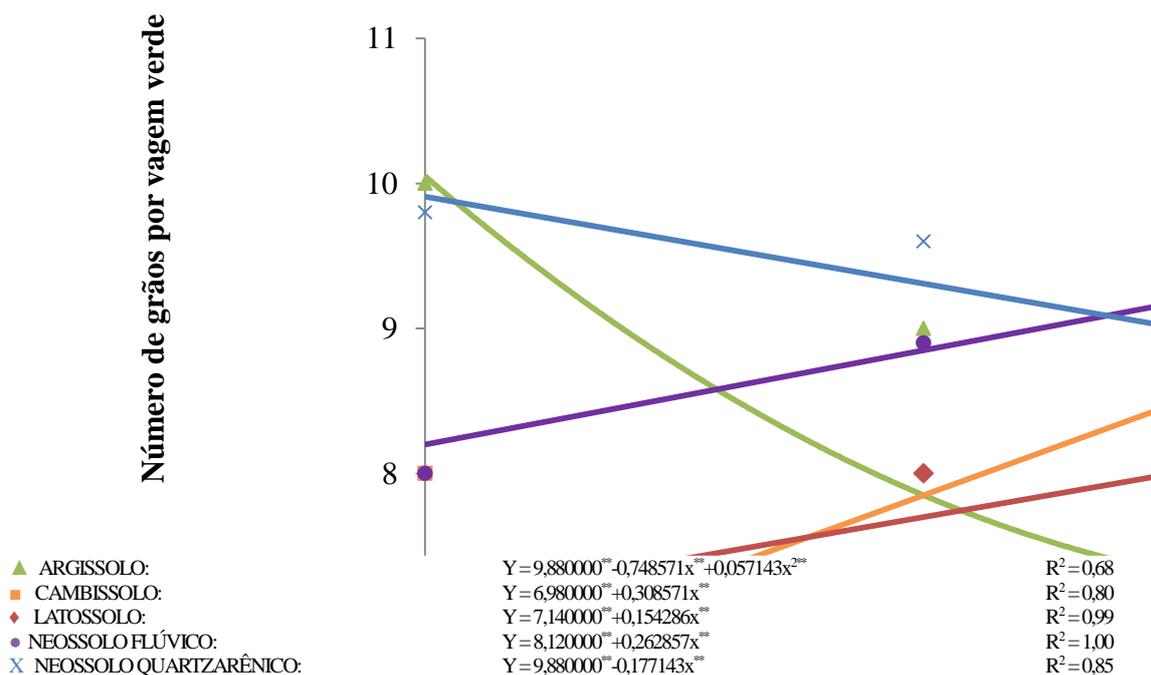


Figura 10 – Número de grãos por vagem verde no segundo cultivo de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013.

#### 4.3.2 Comprimento de vagens

O efeito de interação entre os fatores tipo de solo e dose de carvão vegetal no comprimento médio da vagem de feijão-caupi, no primeiro cultivo, evidencia o comportamento diferenciado do NQS, que foi quadrático em função da dose de carvão vegetal, apresentando ponto de mínimo comprimento na dose de 3,7 t ha<sup>-1</sup> e alcançando 13,5 cm na maior dose (10,5 t ha<sup>-1</sup>). Os outros solos apresentaram comportamento linear positivo do comprimento de vagens em função da dose de carvão vegetal (Figura 11). O efeito mais destacado ocorreu no AS, no qual o comprimento de vagens apresentou incremento de 21% para a maior dose, em relação à dose zero. Os maiores tamanhos de vagem foram observados nos solos NFS e LS, que produziram vagens com 14 a 14,7 cm, respectivamente, tamanhos mais adequados para a colheita manual.

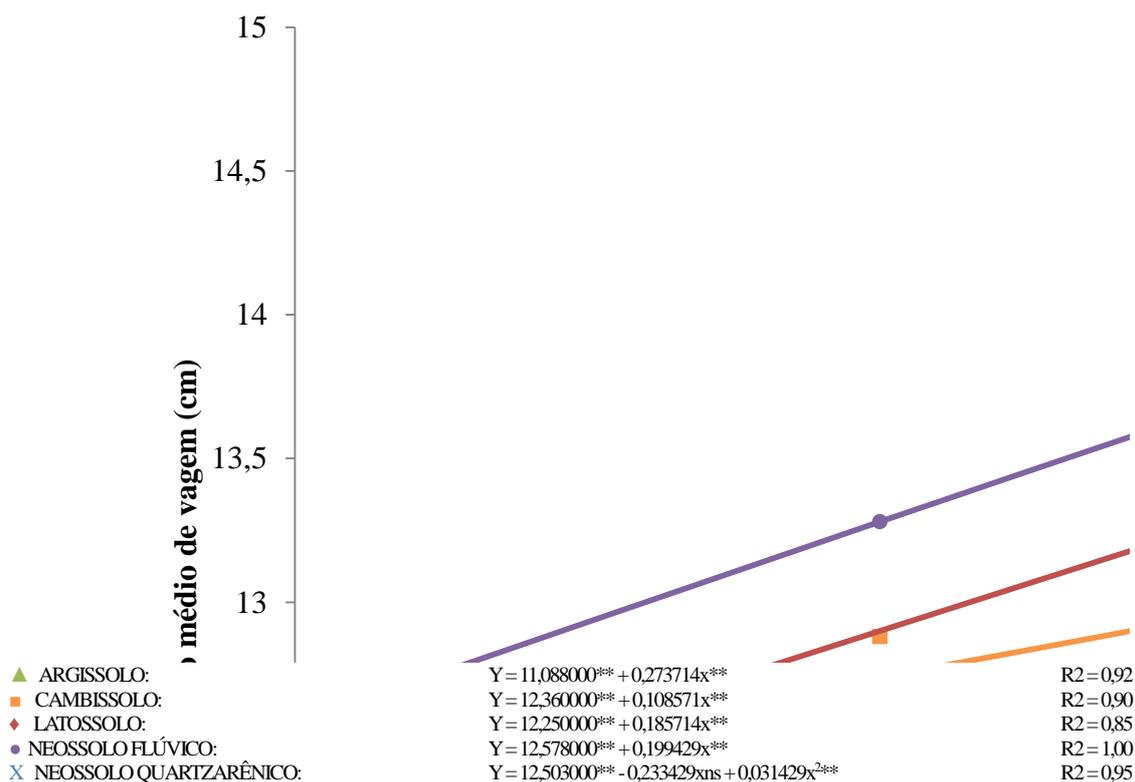


Figura 11 – Comprimento médio de vagem no primeiro cultivo de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

No segundo cultivo de feijão-caupi, o efeito linear positivo das doses de carvão vegetal sobre o comprimento das vagens verdes foi observado apenas nos solos CS, LS e NFS. Os aumentos no comprimento de vagens entre a dose zero e a maior dose foram de 28, 15 e 16% no CS, LS e NFS, respectivamente (Figura 12). Entretanto, o NQS apresentou comportamento quadrático em função da dose de carvão vegetal, com um ponto de máximo comprimento (14,19 cm) na dose 5,3 t ha<sup>-1</sup>. Comportamento inverso foi verificado no AS, que apresentou os menores valores para esta variável na dose de 5,1 t ha<sup>-1</sup>, e na maior dose obteve valores equivalentes aos da dose zero.

Os valores de comprimento de vagens verdes obtidos neste trabalho foram inferiores aos obtidos por Sousa et al. (2015), com a cultivar Guariba, que variaram entre 23,37 cm e 22,74 cm, em cultivo de sequeiro e sob irrigação, respectivamente. Segundo Freire Filho et al. (2011), o mercado de feijão verde exige vagens grandes e atrativas.

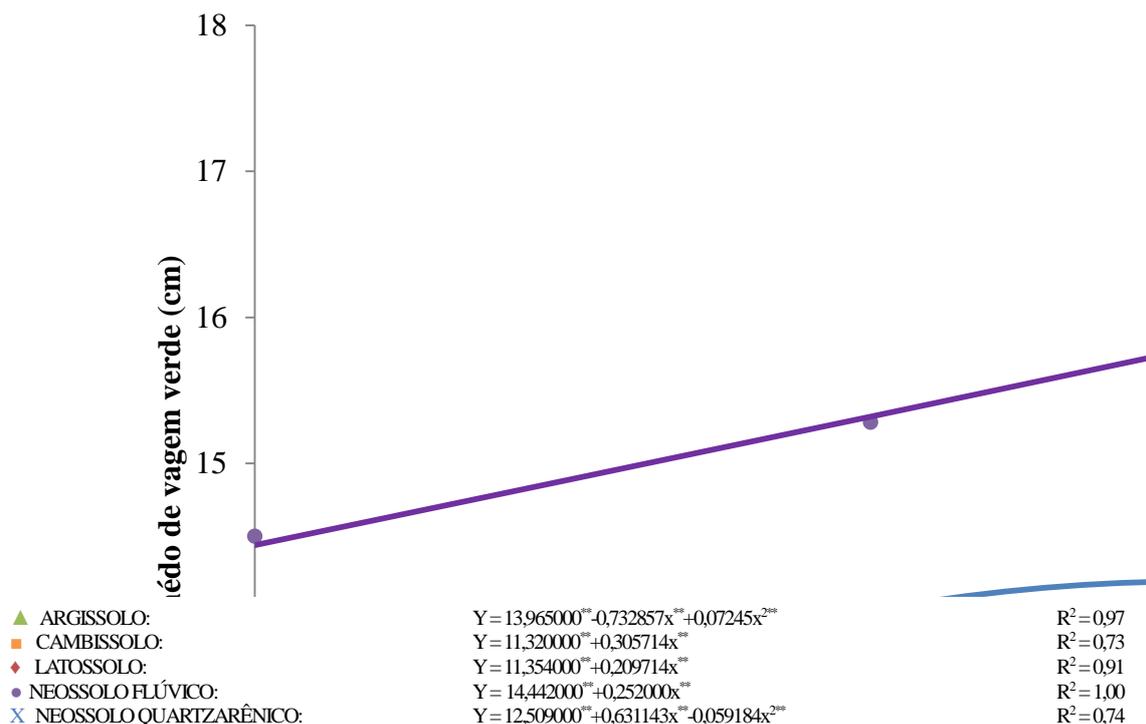


Figura 12 – Comprimento médio de vagem verde no segundo cultivo de de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013.

#### 4.3.3 Massa de 100 grãos

O desdobramento da interação entre os fatores dose de carvão vegetal e tipo de solo evidencia o comportamento do NQS quanto à massa de cem grãos, com pequena diferença em relação ao comportamento linear positivo dos outros solos. O ponto de mínima massa de cem grãos na dose  $1,6 \text{ t ha}^{-1}$  apresenta uma diferença praticamente insignificante em relação ao valor da dose zero, de forma que o comportamento da variável neste solo é praticamente linear positivo (Figura 13). Entre os outros solos, o CS apresentou o aumento mais destacado da massa de 100 grãos entre o tratamento com a dose zero e a maior dose em função da aplicação de carvão vegetal, que foi de 20%.

A massa de cem grãos obteve os maiores valores no NFS, entre os solos, independentemente da dose de carvão vegetal utilizada. Isso é devido a maior fertilidade deste solo, a qual pode ser constatada na Tabela 1. Segundo Silva & Neves (2011), existe uma preferência no mercado por feijão-caupi com massa de 100 grãos em torno de 18 g e formato reniforme ou arredondado.

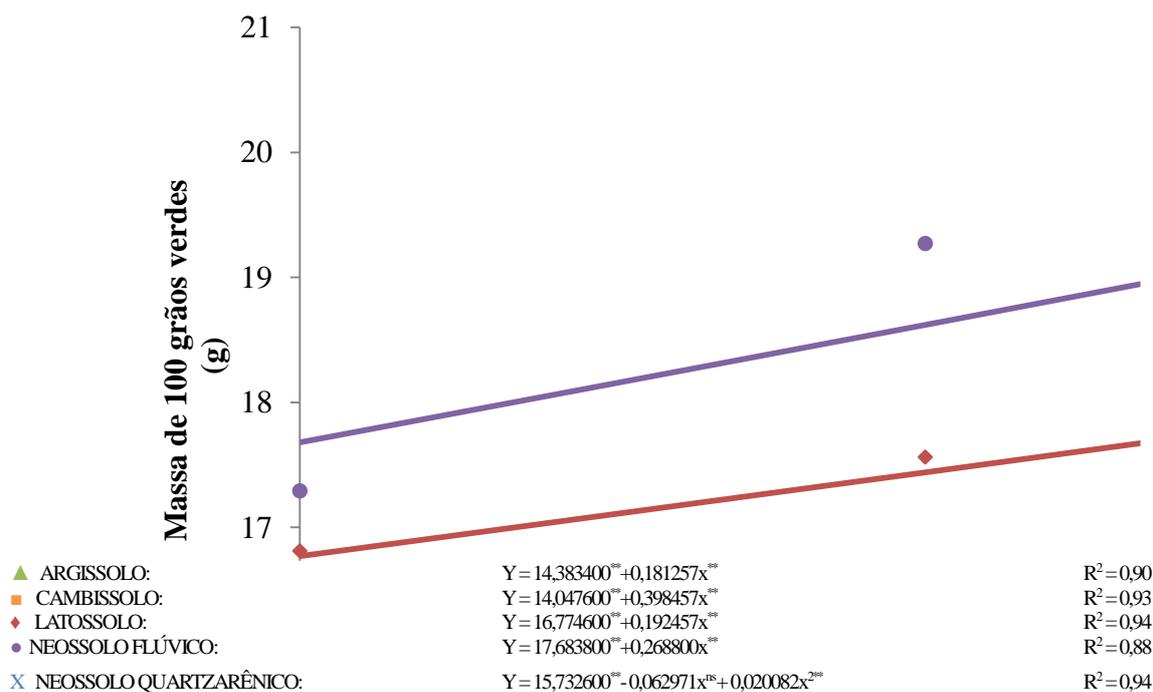


Figura 13 – Massa de 100 grãos secos no primeiro cultivo de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

No segundo cultivo de feijão-caupi, a massa de 100 grãos verdes do feijão-caupi também apresentou os maiores valores no NFS, entre os solos, ultrapassando 40 g na maior dose aplicada e configurando comportamento linear positivo em função das doses de carvão vegetal, no qual os valores praticamente dobraram entre a dose zero e a maior dose (Figura 14). O comportamento linear positivo também foi apresentado no CS e LS. As massas máximas obtidas foram de 25,6; 27,3 e 45,8 g, respectivamente no CS, LS e NFS, na maior dose. Resultados superiores foram identificados no trabalho de Sousa et al. (2015), que avaliou 16 genótipos em dois experimentos, obteve média entre 43,85 g e 39,52 g na massa de cem grãos verdes, em cultivo de sequeiro e irrigado, respectivamente.

Os solos AS e NQS apresentaram comportamento semelhante em função das doses de carvão vegetal. Em ambos os solos o tratamento com a dose zero apresentou os maiores valores e o aumento das doses promoveu efeito quadrático no qual se observaram pontos de mínima massa de cem grãos nas doses de 5,9 t ha<sup>-1</sup> no AS e de 7,5 t ha<sup>-1</sup> no NFS.

Considerando o P100G ser uma característica das cultivares, no presente trabalho foram constatadas variações significativas deste componente de produção, demonstrando influência positiva da aplicação de carvão vegetal no cultivo do feijão-caupi.

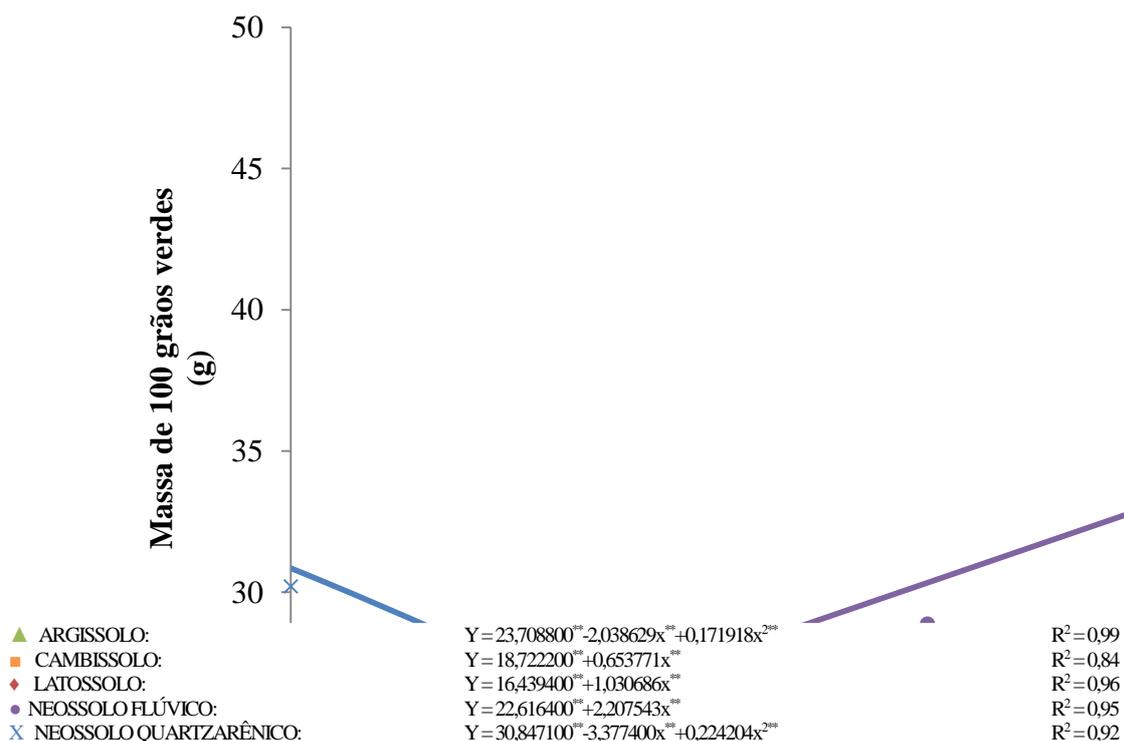


Figura 14 – Massa de 100 grãos verdes no segundo cultivo de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013.

#### 4.3.4 Produtividade do feijão-caupi

Neste trabalho, as produtividades referentes à dose zero, estavam entre 800 e 1000 kg ha<sup>-1</sup> nos diferentes solos, tendo alcançado mais de 1500 kg ha<sup>-1</sup> no NFS quando recebeu a maior dose. As tendências de produtividade do feijão-caupi no primeiro cultivo para os solos em função da dose de carvão vegetal foram semelhantes aos resultados da massa de cem grãos. Para o NFS, LS, AS e CS, foi observado comportamento linear positivo em função da dose de carvão vegetal (Figura 15). O aumento mais pronunciado também ocorreu no NFS, com aumento de aproximadamente 60% na produtividade de grãos secos entre a dose zero e a maior dose. No AS o aumento foi de 33%, enquanto que no LS e CS os aumentos foram de 24 e 13%, respectivamente.

Comportamento diferenciado pode ser verificado para o NQS, no qual as produtividades foram semelhantes entre a dose zero e a maior dose, configurando comportamento quase linear, porém o efeito quadrático se expressou em um ponto de mínima produtividade na dose de 3,1 t ha<sup>-1</sup>. Podendo ser reflexo do pequeno número de grãos (Figura 9) e da massa de cem grãos (Figura 13) da cultivar BRS Potengi, importantes componentes de

rendimento para a cultura. A possível explicação pode estar no fato de que, a aplicação do carvão vegetal no NQS não possibilitou a retenção de nutrientes, que podem ter sido lixiviados pela água da irrigação.

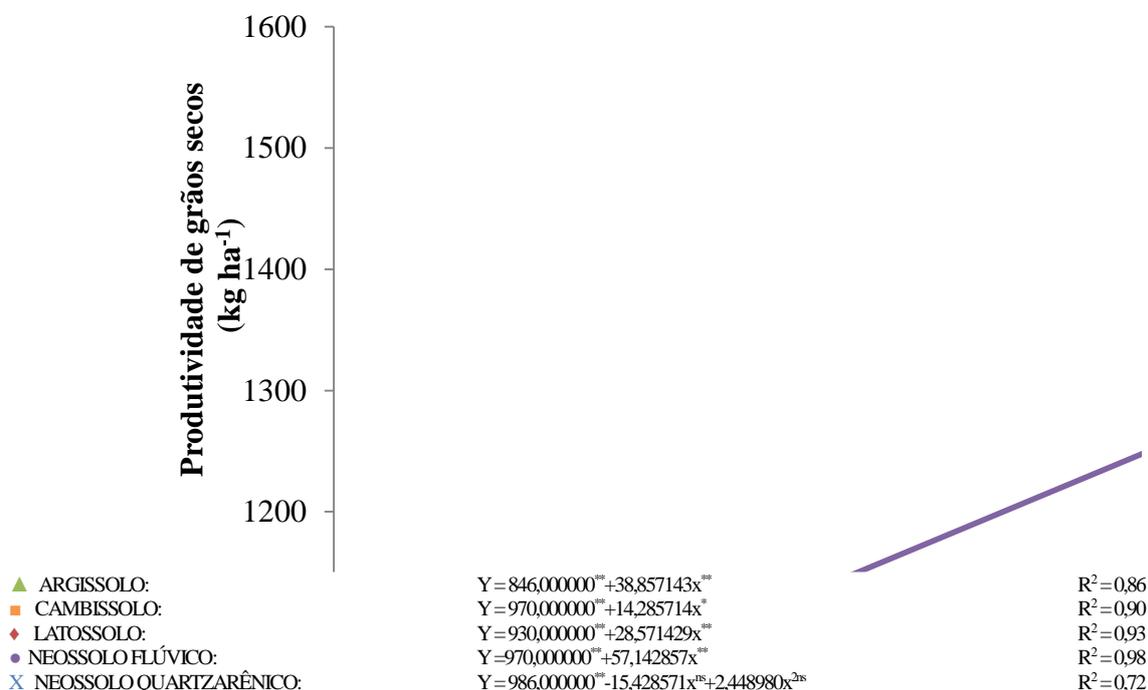


Figura 15 – Produtividade de grãos secos no primeiro cultivo de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

O aumento da produtividade das culturas é um benefício muito divulgado da aplicação de carvão vegetal, embora os resultados experimentais sejam variáveis e dependentes das condições experimentais, principalmente das condições do solo, envolvendo mecanismos ainda não elucidados (Jeffery et al., 2011). Em geral, os efeitos benéficos da aplicação de carvão vegetal podem ser divididos nos com influência direta, como a liberação de nutrientes, ou indireta, como maior retenção de nutrientes, aumentos no pH (Rondon et al., 2007) e capacidade de troca catiônica, melhoria em propriedades físicas do solo (Chan et al., 2008), como maior retenção de água (Laird et al., 2010) e alterações na microbiota do solo (Pietikäinen et al., 2000).

No segundo cultivo, com a ressalva de que em valores absolutos, a produtividade do feijão verde, devido à maior umidade dos grãos, seria maior do que dos grãos secos, as produtividades obtidas significaram diminuição no efeito da aplicação de carvão vegetal. Este resultado deve ser devido à diminuição nos teores de nutrientes nos solos, seja por lixiviação, seja pela absorção pelo primeiro cultivo. Deve-se destacar o efeito mais acentuado do carvão vegetal no NFS, o qual apresentou um aumento linear na produtividade de 50% entre a dose

zero e a maior dose (Figura 16). O CS e o LS também apresentaram comportamento linear positivo em função da dose de carvão vegetal. Desta maneira, nestes três solos foi constatado efeito residual da aplicação do carvão vegetal.

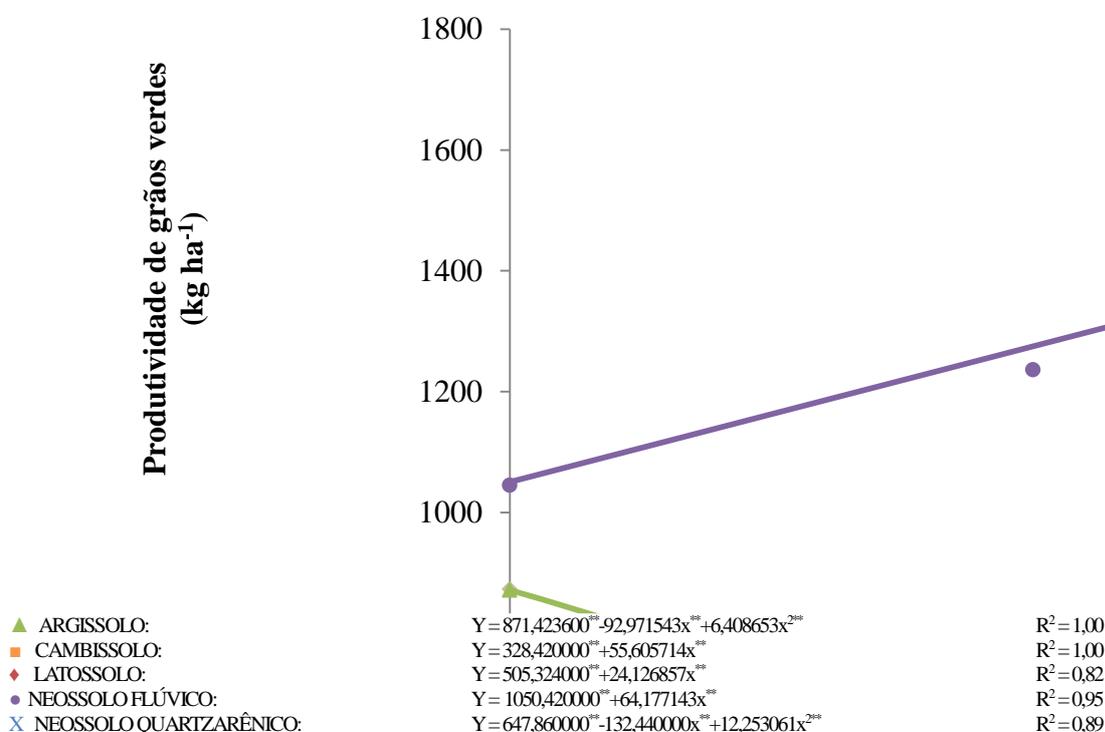


Figura 16 – Produtividade de grãos verdes no segundo cultivo de feijão-caupi cultivado sob doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013.

De modo geral, o NFS foi o solo que alcançou as maiores produtividades, independentemente da dose de carvão vegetal, dentre os demais solos, que apresentaram valores médios inferiores a 1000 kg ha<sup>-1</sup>. Isso deve estar relacionado à maior fertilidade intrínseca deste solo.

A produtividade do feijão verde seguiu um modelo quadrático em função das doses de carvão vegetal no AS e no NQS. Desta forma, os valores máximos corresponderam ao tratamento com a dose zero, tanto no AS (871,42 t ha<sup>-1</sup>), quanto no NQS (647,86 t ha<sup>-1</sup>). Os dois solos apresentaram ponto de mínima produtividade nas doses 7,3 t ha<sup>-1</sup> no AS e de 5,4 t ha<sup>-1</sup> no NQS. As produtividades de grãos verdes obtidas neste trabalho foram inferiores às obtidas por Sousa et al. (2015), cuja média em condições de sequeiro foi de 1.957 kg ha<sup>-1</sup> em condições de sequeiro, enquanto que, sob irrigação, a produtividade obteve média de 2.390 kg ha<sup>-1</sup>.

Resultados positivos da aplicação de carvão vegetal sobre a produtividade de diversas

culturas foram relatados por autores como Topoliantz et al. (2005), em trabalho com a cultura do feijoeiro comum, no qual a aplicação de carvão vegetal influenciou parâmetros fisiológicos tais como número e massa de vagens, relação produtividade-massa de vagens, produtividade-massa de raiz e nódulos nas raízes; Petter (2010) relatou aumento na produtividade da cultura de soja após aplicação de diferentes doses de carvão vegetal ao solo, quando comparado ao solo sem carvão vegetal; assim como Zhao et al. (2014) que concluíram que a aplicação de carvão de palha de arroz, em experimento em casa de vegetação, apresentou efeito positivo sobre a produtividade de arroz e trigo, seguido de efeito positivo na absorção de N, P, K, Ca e Mg pelas plantas, devido principalmente a disponibilidade de P, K, Ca e Mg dos solos incorporados com carvão vegetal.

Incrementos em produtividade devido à aplicação do carvão vegetal também foram obtidos com milho (Zhang et al., 2012) após a aplicação de doses de 20 e 40 t ha<sup>-1</sup> de carvão de palha de trigo, representados por aumentos de 15,8 e 7,3% na produtividade, sem adubação nitrogenada, e de 8,8 e 12,1% com a adubação nitrogenada. Na mesma cultura, após a aplicação de carvão vegetal, Oguntunde et al. (2004) observaram aumentos na produtividade de grãos em torno de 91% e na biomassa em cerca de 44%, comparado com solo sem carvão vegetal. Na Austrália, Van Zwieten et al. (2010) obtiveram aumentos em produtividade de trigo, soja e rabanete de 170, 60 e 15%, respectivamente, após a aplicação de carvão produzido a partir de resíduos da indústria de papel, comparados ao tratamento controle.

Quanto à quantidade de carvão vegetal aplicada ao solo, Jeffery et al. (2011) analisaram, através de revisão literária e análise estatística diferenciada, que aplicações em doses de 10, 25, 50 e 100 t ha<sup>-1</sup> sempre produziram aumento na produtividade agrônômica, quando comparadas ao tratamento controle, sem a aplicação de carvão vegetal. Apesar de que, em alguns trabalhos revisados por eles, doses de 40 e 65 t ha<sup>-1</sup> não se mostraram significativas para a produtividade, comparando-as ao tratamento controle.

#### **4.4 Características químicas do solo**

Após a colheita do segundo cultivo de feijão-caupi, foi constatado efeito significativo da aplicação de carvão vegetal considerando o fator tipo de solo ( $p < 0,01$ ) (Tabela 8) para todas as características químicas avaliadas (pH, MO, P, K, Na, Ca, SB e PST), enquanto que o efeito do fator dose de carvão vegetal apresentou efeito significativo apenas sobre pH, MOS e P ( $p < 0,01$ ) e sobre K e PST ( $p < 0,05$ ). O efeito significativo da interação entre os dois fatores

foi observado para pH, MO, P, K, Na, Ca, PST ( $p < 0,01$ ) e SB ( $p < 0,05$ ).

Tabela 8 – Resumo da análise variância para potencial hidrogeniônico (pH); teor de matéria orgânica (MO); teor de fósforo (P); teor de potássio (K); teor de sódio (Na); teor de magnésio (Mg); saturação de base (SB) e percentagem de sódio trocável (PST) de cinco tipos de solo sob efeito de doses de carvão vegetal. UFERSA, Mossoró- RN, 2013.

Fonte de variação	GL	QUADRADO MÉDIO								
		pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	SB	PST
Bloco	4	0,05*	0,02 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	27,65 <sup>ns</sup>	4,66 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,005 <sup>ns</sup>	0,24 <sup>ns</sup>
Solo	4	8,01**	1,62**	294,72**	16403,99**	17156,10**	413,46**	109,58**	965,52**	448,15**
Dose	3	0,45**	0,08**	4,18**	36,37*	13,41 <sup>ns</sup>	1,04 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	1,44 <sup>ns</sup>	10,82*
Solo x Dose	12	0,25**	0,07**	31,22**	101,01**	281,27**	2,74**	0,53 <sup>ns</sup>	5,79*	11,69**
Resíduo	76	0,02	0,01	0,60	11,48	68,28	1,18	0,36	2,81	1,68
CV (%)	-	1,71	11,54	10,85	8,14	14,90	30,92	34,45	30,43	15,23

\*\*, \* e <sup>ns</sup> significância a 1% e 5% de probabilidade e não significativo pelo Teste F, respectivamente. GL grau de liberdade; CV coeficiente de variação.

#### 4.4.1 pH do solo

O pH indica o grau de acidez do solo e é de extrema importância por determinar a disponibilidade dos nutrientes contidos no solo ou a ele adicionados e também a assimilação dos nutrientes pelas plantas. Neste trabalho, devido aos elevados valores encontrados para o pH, que foram superiores aos valores dos solos antes da aplicação do carvão vegetal, houve uma redução na atividade do  $Al^{3+}$  na solução do solo, a qual é controlada pelo pH, não sendo possível a determinação da acidez potencial (H+Al).

O pH de todos os solos, após o segundo cultivo de feijão-caupi (Figura 17), independente da dose, foi maior do que o seu pH antes da mistura com carvão vegetal (Tabela 1), isto indica que a água de irrigação adicionou sais ao solo, alcalinizando-os, como foi demonstrado por Maia et al. (2001). Assim sendo, o efeito diminuição do pH em alguns solos solo com aumento da dose contraria a noção geral de que o aumento do pH com a aplicação de carvão vegetal é um dos seus principais efeitos positivos, geralmente promovendo aumento em produtividade das culturas (Sohi et al., 2010; Verheijen et al., 2010; Jeffery et al., 2011). Segundo Streubel et al. (2011), o aumento no pH ocorre porque, devido à sua natureza alcalina, o carvão vegetal troca íons  $H^+$  com o solo ao redor. Estudos com carvões pirogênicos que contém elevado teor de cinzas mostram que a reação dos cátions básicos (presentes nas cinzas) possuem maior participação na mudança do pH do solo do que a reação dos grupos funcionais ácidos gerados após oxidação do material (Nguyen & Lehmann, 2009).

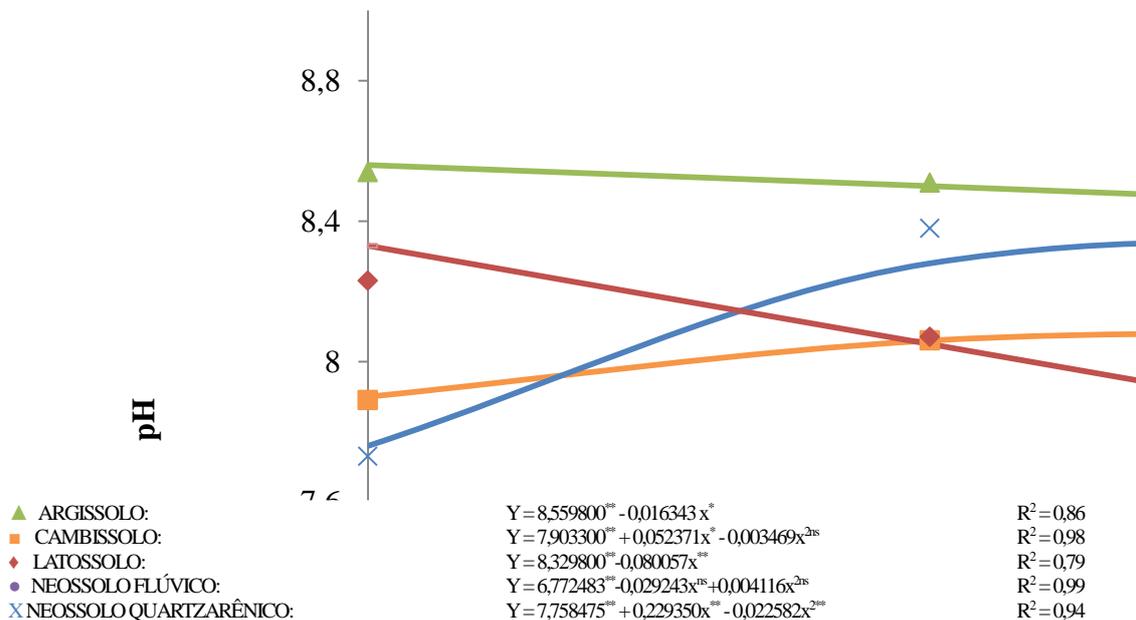


Figura 17 – Potencial hidrogeniônico do solo sob efeito de doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFRSA, Mossoró- RN, 2013.

Na época da amostragem foi constatado o efeito da interação entre dose de carvão vegetal e tipo de solo sobre o pH. O NFS, que apresentava maiores teores de argila, nutrientes e de matéria orgânica, apresentou os menores valores de pH, comparado aos demais solos. O ponto de mínimo pH (6,7), observado com a dose de 3,6 t ha<sup>-1</sup>, representa uma diferença muito pequena em relação a dose zero. Em doses maiores, este solo apresentou ligeira tendência de aumento de pH com o aumento da dose aplicada, da mesma forma que o CS. Nestes dois solos, cujo teor de argila era maior do que nos outros solos, o carvão vegetal continuou exercendo efeito de elevar o pH do solo até o final do experimento. Neste aspecto, Brewer et al. (2011) observaram que os biocarvões aumentaram o pH dos solos, após oito semanas de avaliação, e Streubel et al. (2011) obtiveram aumento do pH de 0,1 até 0,9 unidades para as doses de 9,8; 19,5; e 39,0 t ha<sup>-1</sup> de quatro tipos de carvão vegetal em cinco tipos de solos.

O aumento da dose de carvão vegetal promoveu efeito linear decrescente no pH dos solos AS e LS, com efeito mais evidente no LS, que diminuiu de 8,3 para 7,4 entre a dose zero e a maior dose. O NQS apresentou bom ajuste com as doses de carvão vegetal aplicadas, quando se utilizou o modelo quadrático, ocorrendo um ponto de máximo na dose de 5,1 t ha<sup>-1</sup> (8,3), a partir da qual observa-se reduções do pH. Neste estudo, após o segundo cultivo de feijão-caupi, os solos arenosos responderam negativamente ao aumento da dose de carvão

vegetal. Neste sentido, Streubel et al. (2011) afirmam que a menor capacidade de tamponamento inerente a solos arenosos comparados com solos com maiores teores de silte e argila pode explicar o aumento mais rápido e com mais intensidade do pH do solo. Os autores observaram que um solo arenoso apresentou o maior e mais rápido aumento de pH entre todos os solos. Esta resposta diferiu de solos franco siltosos, os quais apresentaram menores aumentos no pH nas doses de 9,8 e 19,5 t ha<sup>-1</sup> de carvão vegetal, com aumento maior na dose de 39 t ha<sup>-1</sup>.

#### 4.4.2 Matéria orgânica do solo (MOS)

Em relação à variável MOS (Figura 18), as curvas evidenciam que após o segundo cultivo de feijão-caupi, os teores de MOS dos solos sem aplicação foram semelhantes aos valores antes da mistura do carvão vegetal com os solos, com exceção do NFS. Neste aspecto, deve-se salientar que os valores apresentados para os tratamentos com aplicação de carvão vegetal não correspondem aos teores reais de MOS ao final do experimento. Isso é devido a que a metodologia empregada, a mais utilizada em análise de solos (Walkley-Black modificado), mede somente a matéria orgânica oxidável, sem quantificar o carvão, que é uma forma mais estável de matéria orgânica (Madari et al., 2006).

O menor teor de MOS do NFS, em relação aos seus teores originais, que eram bem maiores do que nos outros solos, pode indicar que estes teores eram compostos de formas mais lábeis de MOS, que foram decompostas mais rapidamente. De modo geral, em todos os tratamentos foram verificados valores médios de MO entre 0,6-1,6%, considerado baixo de acordo com Alvarez et al. (1999).

Apesar da aplicação de carvão vegetal ter promovido efeitos distintos sobre cada solo, as doses não promoveram alterações marcantes sobre o teor de MOS, exceto no CS, que ao final do experimento apresentou aumento linear (50%) nos teores em função das doses aplicadas, evidenciando o efeito positivo do carvão vegetal neste solo (Figura 16). Provavelmente, as condições de estrutura e textura do CS possibilitaram a retenção do carvão no solo, minimizando sua perda por lixiviação pela água de irrigação. Os teores de MOS no NFS apresentaram comportamento quadrático em função das doses de carvão vegetal, tendo sido observado um ponto de máximo teor de MOS (1,09%) na dose de 5,6 t ha<sup>-1</sup>, a partir da qual a MOS diminuiu para teores próximos aos da dose zero. Os solos LS, AS e NQS apresentaram teores quase constantes de MOS em função da dose de carvão vegetal, havendo

um comportamento quadrático muito pequeno, indicando que nestes solos a quantidade de carvão lixiviado foi compensada pela maior dose aplicada.

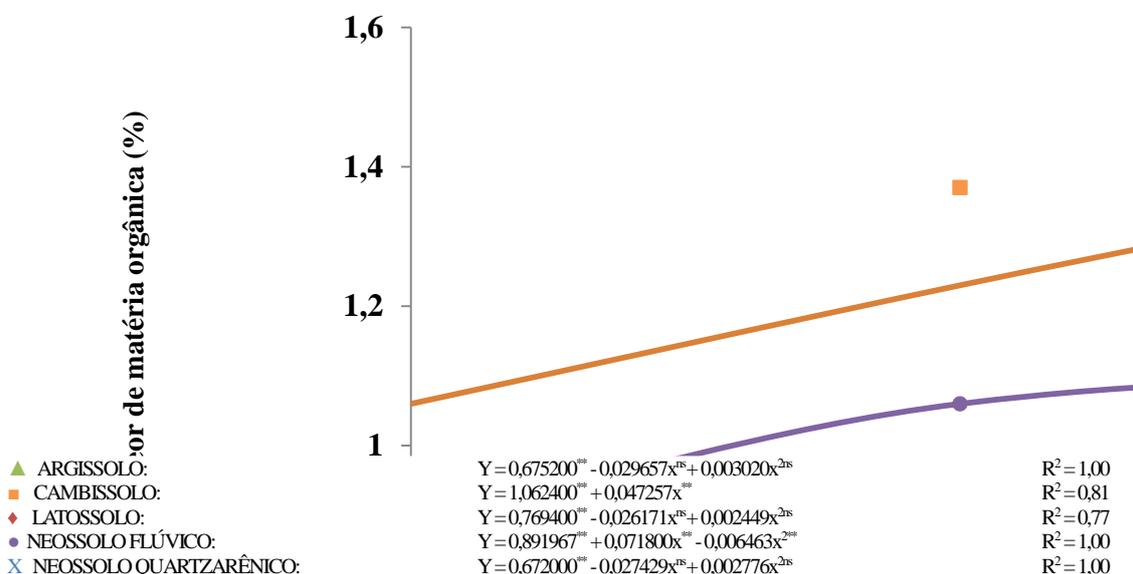


Figura 18 – Teor de matéria orgânica do solo sob efeito de doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013.

Em estudo de Streubel et al. (2011) na maior dose de carvão vegetal (39,0 t ha<sup>-1</sup>) o carbono no solo arenoso aumentou 150% enquanto que nos solos franco siltosos os aumentos variaram entre 25 e 63%. Este aumento diferenciado na MOS dos solos é atribuído a um efeito de diluição, ou seja, os aumentos foram menores nos solos que originalmente já possuíam teores mais altos de MOS.

Entre os trabalhos com aplicação de carvão vegetal, Trazzi (2014) obteve aumento dos teores de carbono do solo com o aumento da dose de carvão vegetal até 12 t ha<sup>-1</sup>, a qual proporcionou os maiores teores, assim como todas as doses foram superiores ao tratamento com a dose zero. Enquanto isso, Mukherjee et al. (2014) avaliaram a aplicação de carvão vegetal, águas residuárias e ácido húmico em solo argilo-siltoso e, após quatro meses de incubação, observaram que o carvão vegetal proporcionou aumentos de 7% no carbono e 15% na superfície específica do solo, além de redução em 13% na densidade, em relação à dose zero.

A MOS do solo, devido ao seu papel vital na manutenção da qualidade do solo e na manutenção da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, deve ser levada em consideração e ser fator chave nas práticas de manejo do solo, como o uso do carvão vegetal, que pode ser fonte

de MOS em longo prazo, devido à presença do carbono pirogênico, apesar de não verificado nos resultados encontrados deste trabalho.

A baixa acumulação de MOS pode ser atribuído à decomposição do carvão vegetal por microrganismos que o utilizam como fonte de nutrientes, mineralização do carbono para CO<sub>2</sub>, ou sua lixiviação pela água de irrigação. Outra hipótese seria o período de tempo em que o experimento foi submetido, não permitindo a oxidação da matéria orgânica possível de ser determinada pelo método Walkley-Black, já que o carbono pirogênico é muito estável. A formação de carvão durante a queima de biomassa pode converter o compartimento de carbono potencialmente ativo em um compartimento mais inerte e representa a maneira pela qual a MOS pode ser protegida por longo tempo. Segundo Streubel et al. (2011), o fato do carvão ser vegetal recalcitrante é importante para o sequestro do carbono em solos agrícolas porque a proporção do C total no carvão vegetal que é recalcitrante eleva o tempo de residência no solo.

#### 4.4.3 Teor de fósforo no solo

Em todos os solos os teores de fósforo, após o segundo cultivo de feijão-caupi, foram menores do que os teores iniciais dos solos antes da aplicação (Figura 19). Essa diminuição pode ter ocorrido devido o efeito do pH sobre a disponibilidade de fósforo, pois em solos alcalinos há precipitação do P com cálcio, como também devido a adsorção pelos coloides do solo ou pelo próprio carvão vegetal. O fósforo é um dos nutrientes mais limitantes a produção agrícola nos solos tropicais, tendo em vista a sua mobilidade e o elevado poder de fixação nos coloides (Machado & Souza, 2012), o que limita sua absorção, sendo considerado um nutriente de baixo aproveitamento pelas plantas, mas considerado um elemento importante para a cultura no processo de formação de grãos.

O efeito de menor disponibilidade do P em solos arenosos, comparado a solos argilosos, pode estar relacionado à maior adsorção pelos complexos minerais, como óxidos de Fe e Al presentes na maioria dos latossolos argilosos, indisponibilizando o mesmo na solução do solo. Segundo Santos et al. (2008), em solos tropicais e subtropicais os óxidos de ferro e as quantidades de Al substituindo o Fe são os principais responsáveis pela adsorção de P ao solo.

Quando se procedeu ao desdobramento da interação doses x solo dos teores de P no solo verificou-se que o comportamento quadrático do NFS foi o mais acentuado. Neste solo, o maior teor de fósforo ocorreu na dose de 4 t ha<sup>-1</sup> (17 mg dm<sup>-3</sup>). Os maiores teores de P no AS

(8,2 mg dm<sup>-3</sup>) e no NQS (4,5 mg dm<sup>-3</sup>) foram obtidos com a dose zero, enquanto que no LS (5,9 mg dm<sup>-3</sup>) foi obtido com a dose de 3 t ha<sup>-1</sup>. Nestes três últimos solos, genericamente, embora tenha ocorrido o efeito significativo da aplicação das doses do carvão vegetal, praticamente não houve alterações quando foram submetidos ao aumento das doses. O CS foi o único a apresentar comportamento linear positivo em função das doses, elevando os teores de 2,5 mg dm<sup>-3</sup> (dose zero) para 8,0 mg dm<sup>-3</sup> (dose 10,5 t ha<sup>-1</sup>), com incremento de 220%, permitindo perceber o efeito benéfico do carvão vegetal na disponibilidade deste nutriente.

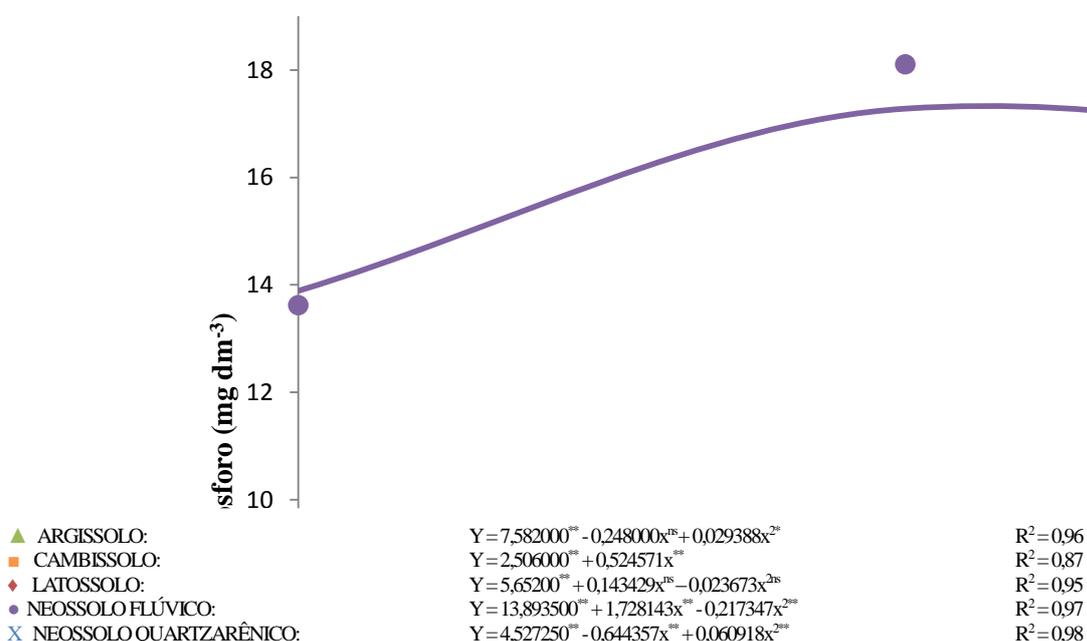


Figura 19 – Teor de fósforo do solo sob efeito de doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013.

A aplicação de carvão vegetal melhora a disponibilidade de P para as plantas, segundo Asai et al. (2009). Isso é confirmado por Gundale & De Luca (2007), que observaram aumento nos teores de fósforo no solo após a aplicação de 2% de carvão em solo arenoso, e por Petter et al. (2012), que obtiveram aumento de 17% na disponibilidade de P quando usaram dose de 32 t ha<sup>-1</sup> em relação à testemunha. Enquanto isso, Lehmann et al. (2003) não verificaram efeito da adição de carvão vegetal na disponibilidade de P em Latossolo e Carvalho et al. (2013) não observaram efeito da aplicação de carvão sobre teores no solo de P e carbono orgânico.

Segundo Madari et al. (2006) o aumento do teor de P no solo pode ser devido à disponibilização deste elemento pelo carvão quando em ligação orgânica com diferentes formas de MOS, enquanto que estando em ligação inorgânica com argilominerais no solo ele

é indisponível para as plantas. Segundo Sohi et al. (2010) o efeito indireto do carvão sobre a disponibilidade de P no solo, além do conteúdo de P na fração cinzas do carvão, podem explicar efeitos a curto prazo da adição de carvão sobre as culturas.

#### 4.4.4 Teor de potássio no solo

O teor de potássio nos solos avaliados diminuiu independente da dose, em relação aos teores iniciais, antes da aplicação de carvão vegetal (Figura 20). O NFS, apesar de ainda conter teor alto de K, superior aos outros solos, apresentou diminuição em relação aos valores iniciais. Este solo apresentou um comportamento quadrático do teor de K em função da dose de carvão vegetal, indicado por um ponto de máximo (118 mg dm<sup>-3</sup>) na dose 4,6 t ha<sup>-1</sup>, considerado como bom, segundo Alvarez et al. (1999).

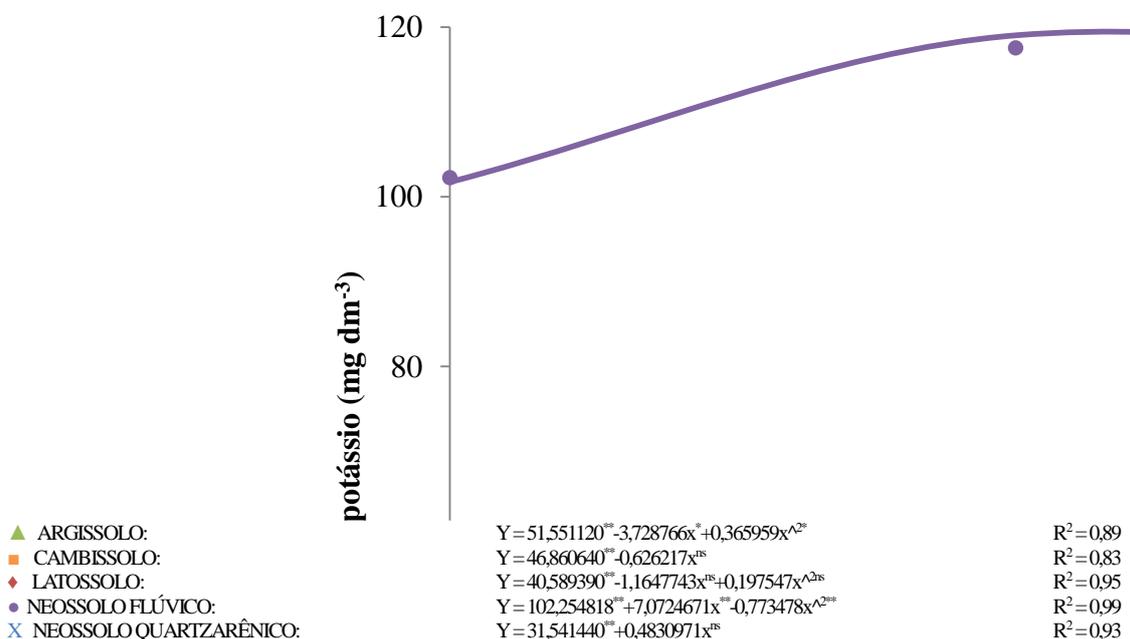


Figura 20 – Teor de potássio do solo sob efeito de doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013.

Os outros solos apresentaram comportamentos distintos em função da dose de carvão vegetal, sem ser observada influência consistente da aplicação do carvão vegetal sobre os teores de K. Enquanto o CS apresentou comportamento linear negativo, com redução de 14%

no teor de K entre a dose zero e a maior dose, o NQS apresentou comportamento linear positivo, com aumento de 14% no teor de K entre as doses extremas. O AS e o LS apresentaram comportamento quadrático muito semelhante, o qual, no entanto, não resultou em variação acentuada nos teores de K nestes solos.

Entre as hipóteses que podem explicar a grande redução nos teores de K ao final do experimento, pode-se citar a absorção pelos dois cultivos, o aumento da concentração de Na trocável no solo, o qual favorece a dessorção e lixiviação do K trocável (Stewart et al., 1990), além da lixiviação do nutriente pela água de irrigação (Werle et al., 2008). No aspecto da lixiviação, os autores observaram que em relação a um solo arenoso, ela foi maior em solo mais argiloso, e foi maior também porque o solo argiloso possuía maior teor inicial de K.

O K trocável é nutriente limitante para as culturas, sendo que o seu baixo teor em relação a altos teores de outros cátions trocáveis pode induzir a um desequilíbrio nutricional, afetando sua absorção e afetando os nutrientes catiônicos essenciais ao crescimento das plantas (Malavolta, 2006). Diferentemente dos resultados obtidos, com exceção do solo NSF, em geral, espera-se aumento nos teores de K do solo devido à aplicação de carvão vegetal. Neste sentido, Jeffery et al. (2011) destacaram que a maior disponibilidade de K no solo é um importante efeito da aplicação do carvão sobre a produtividade das culturas. Neste aspecto, o aumento no teor de potássio disponível para as plantas também foi observado por outros autores (Madari et al., 2006; Chan et al., 2007; Liang et al., 2014).

#### 4.4.5 Teor de sódio no solo

Em relação aos teores iniciais de sódio nos solos, antes da instalação do experimento (Tabela 1), observa-se que os teores de Na ao final do experimento apresentaram aumento considerável nos solos LS e NQS, independente da dose de carvão vegetal aplicada, enquanto que no AS o aumento foi pequeno (Figura 21). Este fato indica que o sódio adicional proveio da água de irrigação. Por outro lado, os teores de Na no NFS e CS apresentaram grande redução.

O LS e o AS, apesar do comportamento quadrático significativo, apresentaram variação muito pequena no teor de Na entre a dose zero e a maior dose de carvão vegetal. Neste aspecto, o NQS apresentou tendência mais nítida de redução no teor de Na com o aumento da dose de carvão vegetal. Os maiores teores de Na observados nos solos mais arenosos, AS, LS e NQS, foram, respectivamente, de 71 mg dm<sup>-3</sup> (dose 3,5 kg ha<sup>-1</sup>), 72 mg

dm<sup>-3</sup> (dose 10,5 kg ha<sup>-1</sup>) e 55 mg dm<sup>-3</sup> (dose zero).

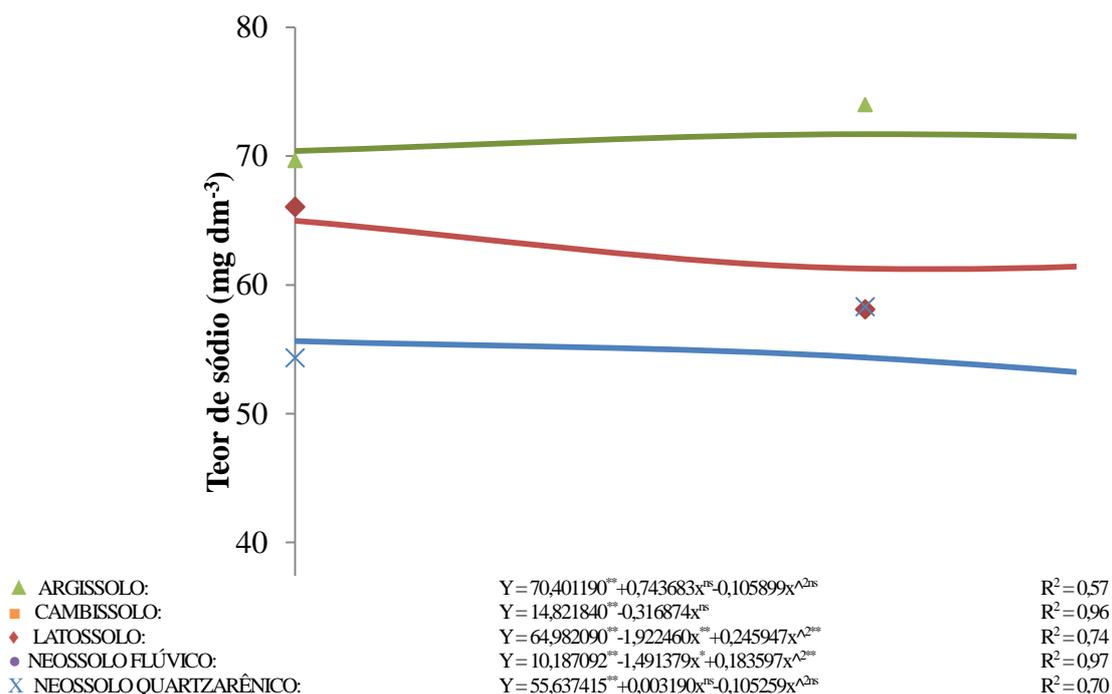


Figura 21 – Teor de sódio do solo sob efeito de doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013.

Em relação aos solos CS, que apresentou comportamento linear, e NFS, que apresentou comportamento quadrático, observa-se que apresentaram variação muito pequena dos teores de Na em função das doses de carvão vegetal, indicando que o efeito residual do carvão vegetal praticamente não existia ao final do experimento. Entre as hipóteses que podem explicar a redução nos teores de Na ao final do experimento, pode ser atribuída à perda pela lixiviação, devido a água de irrigação.

Em relação ao excesso de sais solúveis e/ou sódio trocável que caracterizam os solos afetados por sais, Amorim et al. (2010) citam fatores que provocam redução no crescimento e na produtividade das culturas, como a dificuldade de absorção de água pelas plantas, a toxicidade de alguns íons, principalmente sódio e cloreto, o desequilíbrio nutricional que promove no solo e a redução na infiltração de água no solo.

Com exceção do CS, em todos os solos um maior teor de Na correspondeu a menor teor de K na solução do solo, e vice-versa; isso pode estar associado com a relação competitiva entre os cátions monovalentes sódio e potássio, que competem pelos sítios de troca no solo. A elevação da saturação em sódio no solo pode estar diretamente envolvida nas variações encontradas para o potássio, favorecendo o sódio no complexo de troca.

#### 4.4.6 Teor de cálcio no solo

Os teores de cálcio nos solos estudados, após o segundo cultivo de feijão-caupi, foram semelhantes aos teores anteriores à mistura do solo com o carvão vegetal nos solos AS, LS e NQS, nos quais o comportamento do cálcio em função das doses de carvão vegetal, apesar de significativamente quadrático, não demonstra variação evidente com o uso do carvão vegetal, pois os valores são praticamente constantes (Figura 22).

Por outro lado, no CS foi verificada, ao final do experimento, pequena diminuição nos teores de Ca, que também se apresentam quase constantes em relação à dose de carvão vegetal, apesar da tendência quadrática. Com relação ao NFS, este apresenta os maiores teores de Ca em relação aos outros solos, tanto originalmente, como ao final do experimento. Neste solo, observa-se um comportamento quadrático mais acentuado, apresentando um ponto de máximo teor de Ca na dose de 4,2 t ha<sup>-1</sup>. Teores de Ca no solo maiores do que 4,0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, observados apenas no CS e NFS, são considerados muito bons (Alvarez, 1999). Assim sendo, a aplicação de carvão vegetal não proporcionou aumento no teor de cálcio nos solos deficientes, entretanto, manteve os teores dos solos com boa disponibilidade.

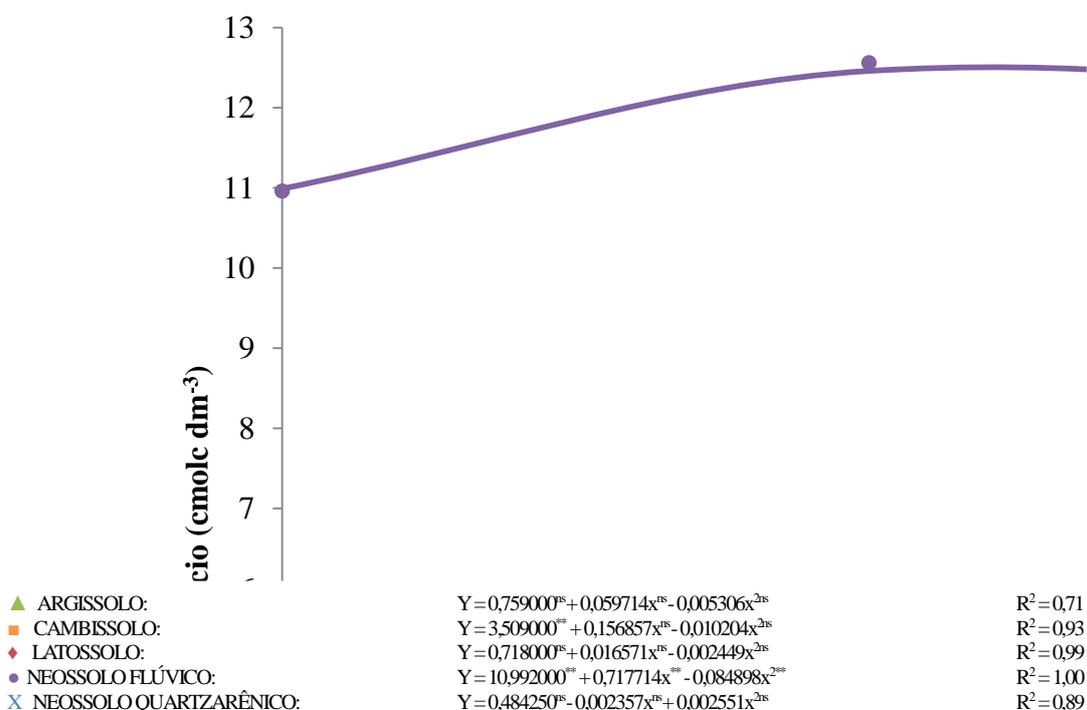


Figura 22 – Teor de cálcio do solo sob efeito de doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013.

A disponibilidade de Ca e Mg é adequada, de modo geral, quando os solos não são

ácidos (Fernandes, 2006), isso é devido a que o pH do solo é altamente correlacionado com esses minerais. Rondon et al. (2006) encontraram menores níveis de Ca com aplicação de carvão ao solo em cultivo com feijão (*Phaseolus vulgaris*) com doses de até 30 t ha<sup>-1</sup>. Comportamento semelhante ocorreu para Mg (10-20 cm), com o menor teor na dose de 4 t ha<sup>-1</sup> e 8 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, aplicados com 300 kg ha<sup>-1</sup> de adubo de base. Petter et al. (2012) afirmaram que a aplicação de carvão vegetal de eucalipto em doses de 8, 16 e 32 t ha<sup>-1</sup> em campo, afetou positivamente a fertilidade do solo, aumentando principalmente a disponibilidade de Ca, P, o pH e o carbono orgânico total dos solos.

#### 4.4.7 Teor de magnésio no solo

Os teores de Mg nos solos não foram influenciados pela aplicação de carvão vegetal nem pela interação entre os dois fatores. Entretanto, houve efeito isolado do fator solo sobre a disponibilidade deste nutriente. Na Tabela 9, observa-se que estes teores são semelhantes aos inicialmente determinados para cada solo, antes da mistura com o carvão vegetal. Apesar de pequenos aumentos nos solos CS e LS e pequenos decréscimos no NFS e NQS. Isto indica que a aplicação de carvão vegetal pode ter contribuído para a manutenção dos teores de Mg, compensando possíveis perdas e absorção pelas plantas após o segundo cultivo de feijão-caupi.

Tabela 9 – Valores médios de teores de magnésio (Mg) em cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró-RN, 2013.

SOLO	Teor de Magnésio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )
Neossolo Flúvico	5,80 a
Cambissolo	0,81 b
Argissolo	0,71 b
Latossolo	0,68 b
Neossolo Quartzarênico	0,46 b

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

Deve-se ressaltar o comportamento do NFS para a concentração de Mg, considerada muito boa (>1,50 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), segundo Alvarez et al. (1999). Isso indica que este solo apresenta características que possibilitem maior retenção destes cátions, provavelmente devido à presença de argilas.

Foi verificado também que os teores de Ca e Mg apresentaram resultados inversamente proporcionais aos teores disponíveis de K para os solos (Figura 20), indicando,

possivelmente um efeito antagônico entre estes nutrientes, pois competem pelos mesmos sítios de absorção pelas raízes.

Em casos de diminuição nos teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) do solo, isto pode ser atribuído ao fato de terem sido deslocados dos sítios de troca para a solução do solo e, então, lixiviados pela água de irrigação. Redução nos teores de Ca e Mg do solo após aplicação de carvão vegetal foi observada por Silva et al. (2011), enquanto que Chan et al. (2007) observaram que a aplicação de doses elevadas de carvão proporcionou aumento nos teores de cátions trocáveis. Da mesma maneira, Carvalho et al. (2013) observaram aumento linear dos teores de Ca e Mg no solo com o aumento da dose de carvão e Petter et al. (2012) observaram aumento no teor de cálcio no solo quando aplicaram 32 t ha<sup>-1</sup> de carvão vegetal em relação à testemunha, porém não verificaram efeito da adição de carvão vegetal sobre o teor de Mg no primeiro ano do experimento.

#### 4.4.8 Porcentagem de sódio trocável

A porcentagem de sódio trocável (PST), usada como indicador na classificação dos solos quanto à sodicidade (Amorim et al., 2010), indica a quantidade de sódio trocável presente no solo em relação aos demais cátions adsorvidos e é muito importante nos estudos de solos afetados por sais, sobretudo quando há predominância do sódio em relação aos demais cátions trocáveis no complexo sortivo.

Na Figura 23, verifica-se que ao final do experimento ocorreu o aumento da PST dos solos em relação aos seus valores iniciais antes da mistura com carvão vegetal. O aumento na PST ocorreu pelo aumento nos teores de sódio no solo e pela diminuição na acidez potencial, que pode inferida a partir do aumento do pH do solo. A exceção é o NFS, cuja PST na dose zero era semelhante ao valor original do solo, mas que apresentou efeito quadrático crescente, alcançando o valor de 4% com a maior dose de carvão vegetal.

A aplicação de carvão vegetal promoveu resposta linear decrescente da PST no solo CS, com diminuição aproximada de um ponto percentual entre a dose zero e a maior dose. Os solos AS, LS e NQS apresentaram resposta quadrática da PST em função da dose de carvão vegetal. Estes solos apresentaram PST variando entre 10 e 16%. No NQS os valores variaram muito pouco em função da dose de carvão vegetal e permaneceram ao redor de 12%. Enquanto isso, o comportamento quadrático do AS se revelou em um ponto de mínima PST (10,4%) na dose de 5,3 t ha<sup>-1</sup>, mas apresentando valores praticamente iguais, ao redor de 13%,

nas doses extremas. O comportamento mais destacado foi do solo LS, com comportamento quadrático crescente, atingindo PST de 16%, na dose máxima aplicada (10,5 t ha<sup>-1</sup>). Isso se deve ao aumento do sódio trocável com o aumento das doses de carvão vegetal.

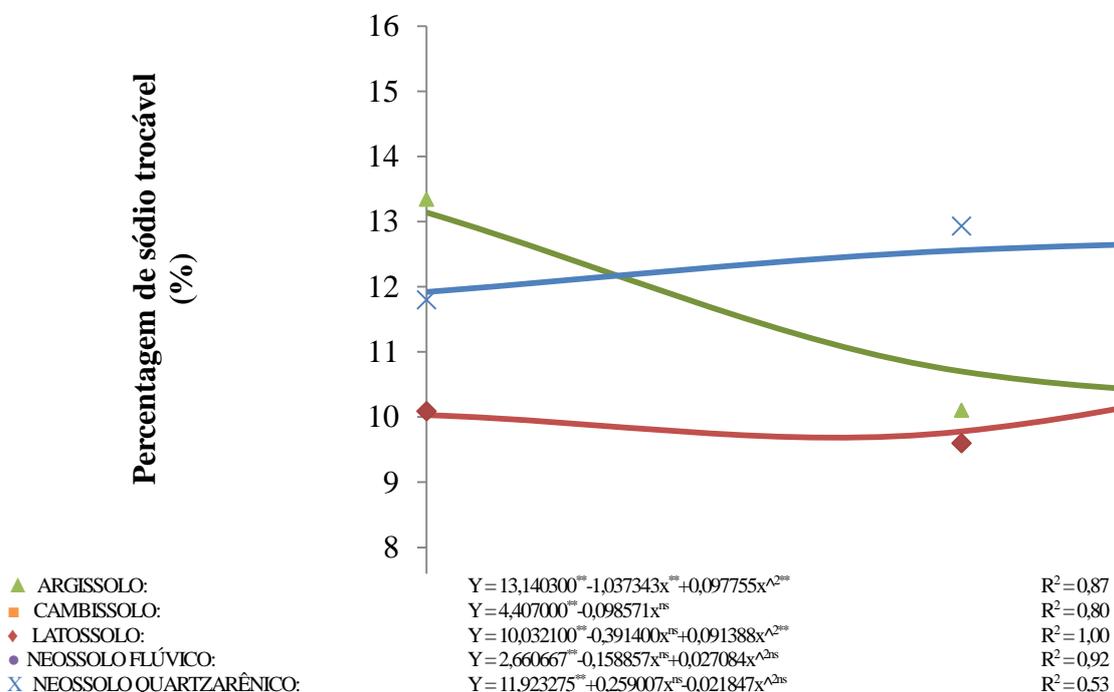


Figura 23 – Percentagem de sódio trocável do solo sob efeito de doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013.

A aplicação de carvão vegetal pode promover aumento da PST (Chan et al., 2007). Neste aspecto, Verheijen et al. (2010) afirmam que os sais contidos no carvão podem ser uma fonte potencial de salinização secundária. Estes autores afirmam que a composição de sais, entre os quais o sódio, na fração cinzas do carvão vegetal, depende da composição de sua matéria prima. Eles também ressaltam que existem poucas pesquisas sobre a possibilidade das cinzas do carvão se tornarem solúveis e causarem a salinização do solo.

Apesar de permanecerem, em geral, abaixo do limite de 15%, que indica a sodicidade do solo (Richards, 1997), os valores de PST variando entre 10 e 16% nos solos AS, LS e NQS estão em uma faixa de valores que representa risco para o solo e as culturas, pois Amorim et al. (2010), baseado em estudos que mostram o efeito do sódio sobre a estrutura do solo, mesmo em níveis inferiores, recomenda considerar-se sódico os solos com PST > 7%. Os solos com alta concentração de sódio no complexo de troca apresentam condições físicas desfavoráveis, que decorrem da dispersão dos colóides e da degradação da estrutura, dificultando a infiltração e a drenagem do solo, e consequentemente, diminuindo a circulação de água e ar, assim causando impedimento a penetração radicular.

#### 4.4.9 Soma de bases no solo

A soma de bases dos solos estudados apresentou, ao final do experimento, valores muito semelhantes aos apresentados originalmente, havendo pequena redução no NFS quando não se aplicou carvão vegetal. Nos solos LS, AS, CS E NQS a SB foi praticamente constante independente da dose de carvão vegetal aplicada (Figura 24). Isso indica que as cargas do solo, antes ocupadas por H<sup>+</sup> e Al, foram ocupadas pelos cátions que tiveram aumentos em seus teores, principalmente pelo Na, e com menor importância, pelo K.

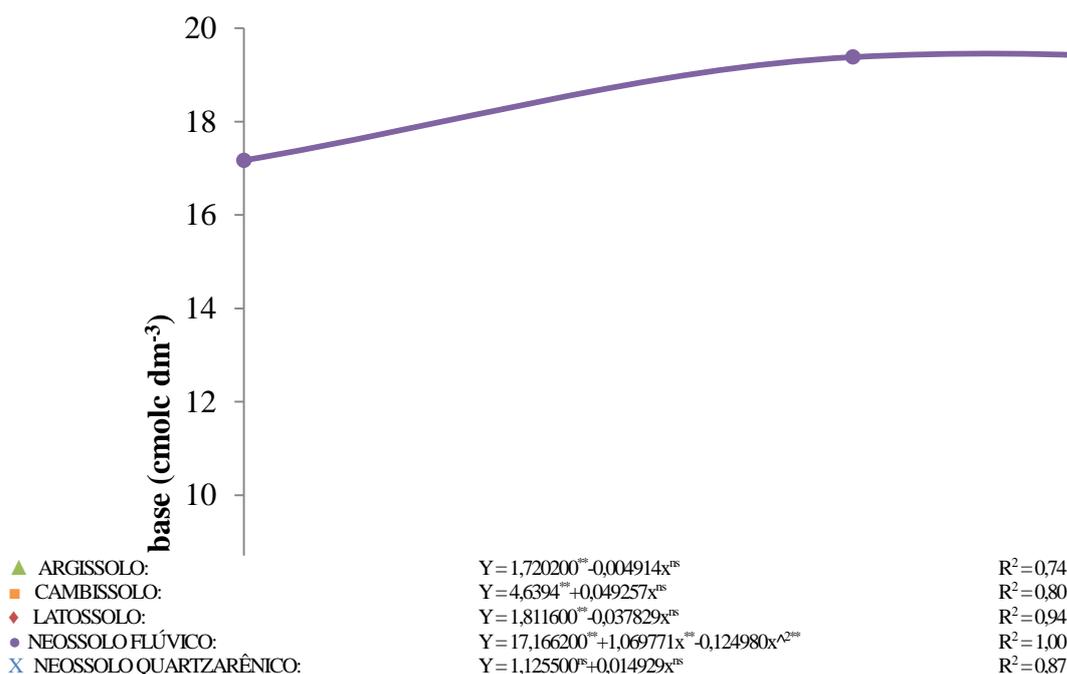


Figura 24 – Soma de bases trocáveis do solo sob efeito de doses de carvão vegetal e cinco tipos de solo. UFERSA, Mossoró- RN, 2013.

A maior influência da aplicação do carvão vegetal sobre ao SB foi obtida no NFS, tendo alcançado a máxima SB (19,5%) na dose de 4,5 t ha<sup>-1</sup> e decrescido até 14,7% na maior dose aplicada. Este comportamento é muito semelhante ao verificado para cálcio e sódio (Figuras 19 e 20), indicando a contribuição destes nutrientes para a variação observada da SB. Os valores de SB citados para o NFS são superiores a 6,0%, que é considerado muito bom, enquanto que entre os demais solos, o CS apresentou valores bons (3,6-6,0%) e os solos de textura mais arenosa (NQS, LS e AS) apresentaram valores muito baixos. Segundo Sohi et al. (2010), se a aplicação de carvão vegetal provocar a disponibilidade de bases trocáveis, ele pode beneficiar a produção das culturas a curto prazo, pois o simples aumento da quantidade de MOS não significa maior disponibilidade de alguns elementos.

Em trabalho com adição de três doses carvão vegetal com quatro granulometrias,

Trazzi (2014) verificou que, em geral, independentemente da granulometria ou quantidade aplicada, o carvão vegetal contribuiu para o aumento do pH, diminuiu os teores de Al e a acidez potencial e a saturação por Al, aumentou os teores disponíveis de Ca, Mg, K e P e aumentou os índices de saturação por bases e a soma de bases, comparando ao tratamento sem carvão vegetal.

## 5 CONCLUSÕES

Com poucas exceções, o comportamento das variáveis em função da dose de carvão vegetal aplicada diferiu conforme o tipo de solo.

A aplicação de carvão vegetal promoveu aumento linear de 14% na capacidade de retenção de água para a maior dose, em relação à dose zero, independentemente do tipo de solo, sendo que NQS e AS apresentaram as maiores médias de retenção de água após a aplicação. Além disso, promoveu redução na densidade do solo apenas no CS e LS, ao final do experimento, sendo que a menor densidade foi observada no NFS, independente da dose de carvão vegetal.

As doses de carvão vegetal promoveram no solo CS os maiores aumentos lineares nos valores das variáveis de crescimento inicial do feijão-caupi, variedade Potengi, sendo 54 % na porcentagem de emergência (E), 35% na altura de plântulas (AP) e 48% na Massa seca da parte aérea (MSP).

As doses de carvão vegetal promoveram aumentos lineares em TE, AP e MSP do feijão-caupi nos solos NQS, LS e CS e apenas na AP no solo AS. As menores TE ocorreram nos solos AS e NFS e as menores MSP, no AS, aumentando com a dose de carvão vegetal.

Independente da dose de carvão vegetal, o solo NFS apresentou os maiores valores de número de grãos por vagem (NGV), comprimento de vagens (CMV), massa de cem grãos (P100G) e produtividade (PROD) do feijão-caupi nos dois cultivos.

A aplicação de carvão vegetal promoveu aumento linear no NGV de 18% entre a dose zero e a maior dose, no primeiro cultivo. Em relação ao tipo de solo, foram observados nos solos NFS, LS e CS, efeitos lineares positivos em função da dose de carvão vegetal sobre NGV, no segundo cultivo, e sobre CMV, P100G e PROD, nos dois cultivos, enquanto que o solo AS apresentou o mesmo efeito sobre CMV, P100G e PROD no primeiro cultivo.

Efeitos negativos do aumento das doses de carvão vegetal foram verificados no NQS, sobre NGV e P100G, e no AS sobre P100G e PROD, todos no segundo cultivo.

Os efeitos mais destacados das doses de carvão vegetal sobre os componentes de produção do feijão-caupi foram aumentos lineares de 21% em CMV no solo AS, 20% no P100G no solo CS e 60% em PROD no solo NFS, no primeiro cultivo, e de 50 % em NGV e 28% em CMV no CS, além de 95% em P100G e 50% em PROD no NFS, no segundo cultivo.

Independente da dose de carvão vegetal, os maiores valores de P, Na, K, Ca, Mg e SB foram obtidos no NFS; de pH e Na no AS e de MOS no CS. Enquanto que o NQS apresentou os menores teores de MOS, P, K, Na e os maiores de PST.

O efeito positivo da aplicação de carvão vegetal ao solo ocorreu para pH no NFS e CS;

para MOS no CS, que apresentou aumento linear de 50% entre as doses extremas, para P apenas no CS e para PST no NFS e LS.

Os valores de algumas características químicas se mantiveram praticamente constantes mesmo com a variação na dose de carvão vegetal, como o teor de Na em todos os solos, menos no NQS, o teor de K nos solos AS, LS e NQS, o teor de Ca em todos os solos e a SB em todos os solos, exceto o NFS.

Observou-se diminuição em função do aumento na dose de carvão vegetal para SB, P, Na e Ca no solo NFS; pH no LS e de K, PST e Na no CS.

## REFERÊNCIAS

Addiscot, T. M. Entropy and sustainability. *European Journal of Soil Science*, Dordrecht, v. 46, p. 161-168, 1992.

Albano, F. G.; Silva Junior, G. B.; Silva, R. S.; Lima, F. N.; Marques, A. S.; Cunha, M. S.; Cavalcante, I. H. L. Carvão vegetal: alternativa para produção de mudas frutíferas no Piauí. In: Seminário de Iniciação Científica, 20; seminário de desenvolvimento tecnológico e inovação, 3, 2011, Teresina. Revelando jovens pesquisadores, divulgando conhecimento científico. Teresina: UFPI, 2011.

Albuquerque, J. A.; Salazar, P.; Barrón, V.; Torrent, J.; Campillo, M. C.; Gallardo, A.; Villar, R. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 33, p. 475–484, 2013.

Alvarez, V.H.V. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: Ribeiro, A.C. et al. COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CFSEMG. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação. Viçosa: MG, Embrapa/UFV/SBCS. Cap.5, p.25–32, 1999.

Amorim, J. R. A.; Cruz, M. A. S.; Resende, R. S.; Bassoi, L. H.; Silva Filho, J. G. Espacialização da porcentagem de sódio trocável do solo no Perímetro Irrigado Califórnia, em Canindé de São Francisco, Sergipe. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros. 17p., 2010.

Andrade Junior, A. S.; Santos A. A. dos; Sobrinho, A. C.; Bastos, E. A.; Melo, F. de B.; Viana, F. M. P.; Freire Filho, F. R.; Carneiro, J. DA S.; Rocha, M. de M.; Cardoso. M. J.; Silva, P. H. S. da; Ribeiro, V. Q. Cultivo de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). Terezina - PI: Embrapa meio Norte, Boletim técnico. 108 p., 2002.

Andrade, F. N.; Rocha, M. de M.; Gomes, R. L. F.; Freire Filho, F. R.; Ramos, S. R. R. Estimativas de parâmetros genéticos em genótipos de feijão-caupi avaliados para feijão fresco. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 41, n. 2, p. 253-258, abr./jun. 2010.

Aquino, S. F.; Nunes, R. P. Estrutura genética de populações de caupi e suas implicações no melhoramento genético através da seleção. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 18, n. 4, p. 399 - 412, 1983.

Asai, H.; Samson, B. K.; Stephan, H. M.; Songyikhansuthor, K.; Homma, K.; Kiyono, Y.;

- Inoue, Y.; Shiraiwa, T.; Horie, T. Biochar amendment techniques for upland rice production in northern Laos: Soil physical properties, leaf spad and grain yield. *Field Crops Research*, v. 111, p. 81-84, 2009.
- Aygun, A.; Yenisoy-Karakas, S.; Duman, I. Production of granular activated carbon from fruit stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. *Microporous and Mesoporous Materials*, Lund, v. 66, p. 189-195, 2003.
- Baldock, J. A.; Smernik, R. J. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Organic Geochemistry*, v. 33, p. 1093-1109. 2002.
- Barros, F. R.; Anunciação Filho, C. J. da; Rocha, M. de M.; Nunes, J. A. R.; Silva, K. J. D. e; Freire Filho, F. R.; Ribeiro, V. Q. Potencial genético de progênies de feijão-caupi segregantes ao tipo da inflorescência. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 46, n. 2, p. 182-189, 2011.
- Bastos, E. A.; Ferreira, V. M.; Silva, C. R.; Andrade Júnior, A. S. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do feijão-caupi no Vale do Gurugúia, Piauí. *Irriga, Botucatu*, v. 13, p. 182-190, 2008.
- Bayer, C.; Mielniczuk, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: Santos, G. A. et al. (Eds.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Ed. Porto Alegre-RS: Genesis, cap. 2, p. 7-18, 2008.
- Benvindo, R. N.; Silva, J. A. L. da; Freire Filho, F. R.; Almeida, A. L. G. de; Oliveira, J. T. S.; Bezerra, A. A. de C. Avaliação de genótipos de feijão-caupi de porte semi-prostrado em cultivo de sequeiro e irrigado. *Comunicata Scientiae, Bom Jesus*, v. 1, n. 1 p. 23-28, 2010.
- Bernardino, M. J.; Tavares, J. Biomassa: a biomassa (massa biológica) é a quantidade de matéria orgânica produzida numa determinada área de um terreno. *Bolsista de Valor: Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense*, v. 1, p. 237-242, 2010.
- Bezerra, A. K. P.; Lacerda, C. F.; Hernandez, F. F. F.; Silva, F. B.; Ghey, H. R. Rotação cultural feijão caupi/milho utilizando-se águas de salinidades diferentes. *Ciência Rural*, v. 40, p. 1075-1082, 2010.
- Biederman, L. A.; Harpole, W. S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *Global Change Biology Bioenergy*, v. 5, p. 202-214, 2013.
- Brennan, J. K.; Badosz, T. J.; Thomson, K. T.; Gubbins, K. E. Water in porous carbons.

Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects, Oxford, v. 187–188, p. 539–568, 2001.

Brewer, C. E.; Unger, R.; Schmidt-Rohr, K. S.; Brown, R. C. Criteria to select biochars for field studies based on biochar chemical properties. *Bioenergy Research*, v. 4, p. 312–323, 2011.

Brown, R. Biochar Production Technology. In: *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (Eds. Lehmann, J. & Joseph, S.), Earthscan, 2009.

Bruun, E. S.; Ambus, P.; Egsgaard, H.; Huggaard-Nielsen, H. Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 46, p. 73–79, 2012.

Carmo Filho, F. do; Espinola Sobrinho, J.; Maia Neto, J. M. Dados Climatológicos de Mossoró: Um município semi-árido nordestino. Mossoró: ESAM. 1991. 121 p. (Coleção Mossoroense, C 30).

Carvalho, M. A. B.; Miranda, N. O.; Pimenta, A. S.; Silva, G. G. C.; Oliveira, E. M. M.; Bezerra, M. G. S. Retenção de água pela aplicação de biochar em solo arenoso. In: *Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 24, Brasília, 2014. Anais. Viçosa: ABID, 2014. 1 CD ROM.*

Carvalho, M. T. M. et al. Biochar improves soil fertility of a clay soil in the Brazilian Savannah: short term effects and impact on rice yield. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*, Witzenhausen, v. 114, p. 101-107, 2013.

Casaroli, D.; Van Lier, Q. J. Critérios para determinação da capacidade de vaso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, p. 59-66, 2008.

Cavalcante, I. H. L.; Petter, F. A.; Albano, F. G.; Silva, R. R. S.; Silva Júnior, G. B. Biochar no substrato para produção de mudas de maracujazeiro amarelo. *Revista de la Facultad de Agronomía (La Plata)*, v. 111, p. 41-47, 2012.

Chan, K. Y. et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Soil Research*, Canberra, v. 45, p. 629–634, 2007.

Chan, K.Y. L. Van Zwieten, I.; Meszaros, A. Downie; S. Joseph. 2008. Using poultry litter biochar as soil amendments. *Australian Journal of Soil Research*, v. 46, p. 437–444, 2008.

- Cheng, C. H., Lehmann, J.; Thies, J. E. e Burton, S.D. Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, G02027. 2008.
- Chidumayo, E. N. Effects of wood carbonization on soil and initial development of seedlings in miombo woodland, Zambia. *Forest Ecology and Management*, v. 70, p. 353-357, 1994.
- Costa, F. S.; Albuquerque, J. A.; Bayer, C.; Fontoura, S. M. V.; Wobeto, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas semeadura direta e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, p. 527 - 537, 2003.
- Cunha, T. J. F.; Novotny, E. H.; Madari, B. E.; Benites, V. M.; Martin-Neto, L.; Santos, G. A. O carbono pirogênico. In: Teixeira, W. G.; Kern, D. C.; Madari, B. E.; Lima, H. N.; Woods, W. I. (Ed.). *As Terras Pretas de Índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas*. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, p. 263-284. 2009.
- Cunha, T. J. F.; Petreire, V. G.; Silva, D. J.; Mendes, A. M. S.; Melo, R. F.; Oliveira Neto, M. B.; Silva, M. S. L.; Alvarez, I. A. Principais solos do Semiárido tropical brasileiro: Caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo. In: SÁ, I.B.; SILVA, P.C.G. (Ed). *Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação*. Petrolina: Embrapa Semiárido, cap. 2, p. 50-87, 2010.
- Denevan, W. *As Origens Agrícolas da Terra Mulata na Amazônia*. 2012. Disponível em: <[http://www.biochar.org/joomla/images/stories/Cap\\_7\\_Denevan.pdf](http://www.biochar.org/joomla/images/stories/Cap_7_Denevan.pdf)> Acesso em 10/10/2015.
- Downie, A.; Crosky, A.; Munroe, P. Physical Properties of Biochar. In: Lehmann, J.; Joseph, S (ed). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. 1. Ed. Londres: earthscan, 416 p., 2009.
- Dugan, E; Verhoef, A.; Robinson, S.; Sohi, S. Bio-char from sawdust, maize stover and charcoal: Impact on water holding capacities (WHC) of three soils from Ghana. *World Congress of Soil Science*, 19, Brisbane, 2010. *Proceedings*. Brisbane: Australian Society of Soil Science, 2010. Published on DVD.
- Elad, Y.; David, D. R.; Harel, Y. M.; Borenshtein, M.; Kalifa, H. B.; Silber, A.; Graber, E. R. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. *Disease Control and Pest Management*, v. 100, p. 913-921, 2010.

- EMBRAPA. AGEITEC. Estatísticas da produção de Feijão caupi. Disponível: Acesso em: 03 nov. 2014. EMBRAPA MEIO-NORTE. Sistemas de Produção 2; versão eletrônica. Disponível: Acesso em: 03 nov. 2014
- EMBRAPA. BRS Potengi: nova cultivar de feijão-caupi de grão branco. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2009. 1 folder.
- EMBRAPA. BRS Guariba: nova cultivar de feijão-caupi para a Região Meio-Norte. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2004. 1 Folder.
- EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 624 p. 1999.
- Ertas, M.; Alma, H. Pyrolysis of laurel (*Laurus nobilis* L.) extraction residues in a fixed-bed reactor: Characterization of bio-oil and bio-char. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 88, p. 22–29, 2010.
- Esmaelnejad, L.; Shorafa, M.; Gorji, M.; Hosseini, S. M. Enhancement of physical and hydrological properties of a sandy loam soil via application of different biochar particle sizes during incubation period. *Spanish Journal of Agricultural Research, Madrid*, v. 14, p. 14, 2016.
- Farias, J. R. B.; Bergamaschi, H.; Martins, S. R. Evapotranspiração no interior de estufas plásticas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria*, v.2, p.17-22, 1994.
- Fernandes, M.S. Nutrição mineral de plantas. Viçosa: SBCS, 432 p., 2006.
- Ferreira, D. F. Programa SISVAR: sistema de análise de variância. Versão 5.1 (Build 72). Lavras: DEX/UFLA. 2007.
- Figueiredo, A. L. Pirólise termoquímica de pós da fibra de coco seco em um reator de cilindro rotativo para produção de bio-óleo. Natal: UFRN/PPGCEP. 126 f. 2011. Dissertação de Mestrado.
- Fonseca, M. R.; Fernandes, A. R.; Silva, G. R.; Brasil, E. C. Teor e acúmulo de nutrientes por plantas de feijão caupi em função do fósforo e da saturação por bases. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 53, p. 195-205, 2010.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. FAO. FAO Statistical yearbook 2013. World Food and Agriculture. Rome. 289 p., 2013.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. FAO. The state of the world's land and water resources for food and agriculture. Managing systems at risk. Summary Report. Rome, 47p., 2011.

Freitas, F. C. L.; Medeiros, V. F. L. P.; Grangeiro, L. C.; Silva, M. G. O.; Nascimento, P.G.M.L.; Nunes, G.H. Interferência de plantas daninhas na cultura do feijão-caupi. *Planta daninha*, v.27, p. 241-247, 2009.

Freire Filho, F.R. Genética do caupi. In: Araújo, J. P. P.; Watt, E. E. O caupi no Brasil. Brasília: IITA/EMBRAPA, p. 159 - 229. 1988.

Freire Filho, F. R.; Ribeiro, V. Q.; Rocha, M. M.; Damasceno-Silva, K. J.; Nogueira, M.S.R.; Rodrigues, E.V. Feijão-caupi: produção, melhoramento genético, avanços e desafios. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 81 p., 2011.

Gaskin, J W.; Speir, R. A.; Keith Harris, K. C. das; Lee, R. D.; Morris L. A.; Fisher, D. S.. Effect of Peanut Hull and Pine Chip Biochar on Soil Nutrients, Corn Nutrient Status, and Yield. *Agronomy Journal*, v. 102. p. 623-33, 2010.

Glaser, B.; Haumaier, L.; Guggenberger, G.; Zech, W. The "Terra Preta" phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, v. 88, p. 37-41, 2001.

Glaser, B.; Lehmann, J.; Zech, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soil in the tropic with charcoal – a review. *Biology and Fertility of Soils*, Berlin, v. 35, p. 219-230. 2002.

Glaser, B; Guggenberger, G.; Zech, W; Ruivo, M. L. Soil organic matter stability in Amazonian Dark Earths. In: Lehmann, J. et al. (Eds.). *Amazonian dark earths: origin, properties, management*. Dordrecht: Kluwer Academic, p. 141-158, 2003.

Guedes, R. E. Bases para o Cultivo Orgânico de Feijão-Caupi [*Vigna unguiculata* L. (Walp.)] Seropédica – RJ: UFRRJ, 93f. 2008. Tese de Doutorado.

Gundale, M. J.; De Luca, T. H. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem. *Biology and Fertility of Soils*, Berlin, v. 43, p. 303-311. 2007.

Herath, H. M. S. K.; Camps-Arbestain, M.; Hedley, M. Effects of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an alfisol and andisol. *Geoderma*, Amsterdam, v. 209-210,

p. 188-197, 2013.

Janzen, H. H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 38, p.419–424, 2006

Jeffery, S.; Verheijen, F. G. A.; Velde, M. van der; Bastos, A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Melbourne, v. 144, p. 175-187, 2011.

Kammann, C. I.; Linsel, S.; Göbbling, J. W.; Koyro, H. W. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil–plant relations. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 345, p.195–210, 2011.

Kampf, N.; Kern, D. C. O solo como registro de ocupação humana pré-histórica na Amazônia. *Tópicos em Ciência do Solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 4, p. 277-320. 2005.

Karhu, K.; Mattila, T.; Bergström, I.; Regina, K. Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 140, p. 309-313, 2011.

Kern, D. Aquino, G.; Rodrigues, T. E.; Frazão, F. J. L.; Sombroek, W.; Neves, E. G.; Myers, T. P. Distribution of antropogenic dark earths. In: Lehmann, J.; Kern, D. C.; Woods, W.; Glaser, B. (Org.). *Amazonian dark Earths: origin, properties, management*. 1 ed. Norwell: kluwer Academic Publishers, p.51-76, 2003.

Kern, D. C.; Kämpf, N. Antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná, Pará. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 13, p. 219-225, 1989.

Kinney, T. J.; Masiello, C. A.; Dugan, B.; Hockaday, W. C.; Dean, M. R.; Zygourakis, K.; Barnes, R. T. Hydrologic properties of biochar produced at different temperatures. *Biomass Bioenergy*, v. 41, p. 34-43, 2012.

Kramer, R. W.; Kujawinski, E. B.; Hatcher, P. G. Identification of black carbon derived structures in a volcanic ash soil humic acid by fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. *Environmental Science and Technology*, v. 38, p. 3387-3395. 2004.

Laird, D. A.; Fleming, P. D.; Davis, D. D.; Horton, R.; Wang, B.; Karlen, D. L. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*,

Amsterdam, v. 158, p. 443-449, 2010.

Lehmann, J., da Silva, JR., J. P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W. e Glaser, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 249, p. 343–357. 2003.

Lehmann, J., Liang, B., Solomon, D., Leriche, M., Luizão, F., Kinyangi, F., Schäfer, T., Wirrick, S. e Jacobsen, C. Near-edge X-ray absorption fine structure (NEXAFS) spectroscopy for mapping nano-scale distribution of organic carbon forms in soil: Application to black carbon particles. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 19, GB1013, 2005.

Lehmann, J.; Joseph, S. Biochar for Environmental Management: An Introduction. In: *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. 1a ed, Londres: Earthscan, p. 4-18, 2009.

Liang, B.; Lehmann, J.; Solomon, D.; Kinyangi, J.; Grossman, J.; O’neill, B.; Skjemstad, J. O.; Thies, J.; Luizão, F. J.; Petersen, J.; Neves, E. G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 70, p. 1719-1730, 2006.

Liang, F.; Li, G.; Lin, Q.; Zhao, X. Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil. *Journal of Integrative Agriculture*, v.13, p. 525-532, 2014.

Lima, S. L.; Oliveira, S. T.; Marimon-Junior, B. H.; Petter, F. A.; Tamiozzo, S.; Buck, . B.; Marimon, B. S. Biochar as substitute for organic matter in the composition of substrates for seedlings. *Acta Scientiarum*, Londrina, v. 35, p. 333-341, 2013.

Lira, M. M. P.; Carvalho, R. M. C. M. O.; Lyra, M. R. C. C.; Sobral, M. C. M.; SILVA, G. M. N. Avaliação da produtividade da cana-de-açúcar *Saccharum spp.* sob cultivo utilizando carvão vegetal produzido com o bagaço da cana-de-açúcar. In: *Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência*, 65, 2013, Recife. *Ciência para um novo Brasil*. Recife: UFPE: SBPC, 2013.

Machado, C. de F.; Teixeira, N. J. P.; Freire Filho, F. R.; Rocha, M de M ; Gomes, R. L. F. Identificação de genótipos de feijão-caupi quanto à precocidade, arquitetura da planta e produtividade de grãos. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 39, p. 114- 123, 2008.

Machado, V. J.; Souza, C. H. E. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas

após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 28, suplemento 1, p. 1-7, 2012.

Madari, B. E.; Costa, A. R.; CASTRO, L. M.; Santos, J. L. S.; Benites, V. M.; Rocha, A. O.; Machado, P. L. O. A. Carvão vegetal como condicionador de solo para arroz de terras altas (cultivar primavera): Um estudo prospectivo. Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, n. 125. 2006. 2p. (Comunicado Técnico 125)

Madari, B. E.; Cunha, T. J. F.; Novotny, E. H.; Milori, D. M. B. P.; Martinneto, L.; Benites, V. M.; Coelho, M. R.; Santos, G. A. Matéria Orgânica dos Solos Antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): Suas Características e Papel na Sustentabilidade da Fertilidade do Solo. In: Teixeira, W. G.; Kern, D.C.; Madari, B. E.; Lima, H. N.; Woods, W. As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas. Manaus, AM. 1ª ed.: Embrapa Amazônia Ocidental, p. 172-188, 2009.

Maekawa, K. Curso sobre produção de carvão, extrato pirolenhoso e seu uso na agricultura (APAN – Associação dos produtores de Agricultura natural). Apostila. 2002.

Maia, C. E.; Morais, E. R. C.; Oliveira, M. Estimativa de carbonato de cálcio aplicado via água de irrigação nas regiões da Chapada do Apodi e Baixo Açu, RN. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 5, p. 71-75 2001.

Maia, C. M. B. de F. Finos de carvão: fontes de carvão estável e condicionador de solos. Colombo: Embrapa Florestas, 36 p. 2010 (Documentos, 200).

Maia, C. M. B. F., Sohi, S.P., The effect of biochar on soil-carbon stabilization in a highly SOM depleted soil. 3rd IBI Meeting, Rio de Janeiro, Proceedings, 2010.

Major, J.; Steiner, C.; Ditommaso, A.; Falcão, N. P. S.; Lehmann, J. Weed composition and cover after three years of soil fertility management in the central Brazilian Amazon: Compost, fertilizer, manure and charcoal applications. *Weed Biology Management*, Kyoto, v. 5, p. 69-76, 2005.

Malavolta, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 638 p., 2006.

Mangrich, A. S.; Maia, C. M. B. F.; Novotny, E. H. Carvão vegetal: as Terras Pretas de índios e o sequestro de carbono. *Ciência Hoje*, v. 281, p. 48-52, 2011.

Matos Filho, C. H. A.; Gomes, R. L. F.; Rocha, M. de M.; Freire Filho, F. R.; Lopes, A. C. de

- A. Potencial produtivo de progênies de feijão-caupi com arquitetura ereta de planta. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 39, p. 348-354, 2009.
- Mesa, J. M.; Rocha, J. D.; Olivares, E.; Barboza, L. A.; Brossard, J. E.; Brossard Junior, L. E. Pirólise rápida em leito fluidizado: Uma opção para transformar biomassa em energia limpa, *Revista Analytica*, n. 4, p. 32-36, 2003.
- Mielniczuk, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: Santos, G. A. et al. (Eds.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Genesis, cap.1, p. 1-5, 2008.
- Milla, O. V.; Rivera, E. B.; Huang, W. J.; Chien, C. C.; Wang, Y. M. Agronomic properties and characterization of rice husk and wood biochar and their effect on the growth of water spinach in a field test. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 13, p. 251-266, 2013.
- Morales. M. M. Efeito do carvão vegetal sobre o comportamento da matéria orgânica e do fósforo em solo degradado. 2010. 88 f. Botucatu: FCA/UNESP, 2010. Tese de Doutorado.
- Mukherjee, A.; LAL, R.; A. R. Zimmerman, A. R. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. *Science of the Total Environment*, v. 487, p. 26–36, 2014.
- Nguyen, B., Lehmann, J. Black carbon decomposition under varying water regimes. *Organic Geochemistry*, v. 40, p. 846-853, 2009.
- Nóbrega, I. P. C. Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: Sequestro de carbono no solo. 2011. 38 f. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia/Universidade Técnica de Lisboa, 2011. Dissertação de Mestrado.
- Novak, J. M.; Busscher, W. J.; Laird, D. L.; Ahmedna, M.; Watts, D. W.; NIANDOU, M. A. S. Impact of biohar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science*, v. 174, p. 105-112, 2009.
- Novotny, E.; Hayes, M. H. B.; Madari, B. E.; Bonagamba, T. J.; Azevedo, E. R. de; Souza, A. A. de; Song, G.; Nogueira, C. M.; Mangrich, A. S. Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon Region for the utilization of charcoal for soil amendment. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 20, p. 1003-1010, 2009.
- Novotny, E. H.; DE Azevedo, E. R.; Bonagamba, T. J.; Cunha, T. J. F.; Madari, B. E.; Benites, V. M. e Hayes, M. H. B. Studies of the compositions of humic acids from

Amazonian Dark Earth soils. *Environmental Science and Technology*, v. 41, p. 400-405, 2007.

Nunes, L. A. P. L. Qualidade de um solo cultivado com café e sob mata secundária no Município de Viçosa - MG. 2003. 102f. Viçosa: UFV. 2003. Tese de Doutorado.

Oguntunde, P. G.; Fosu, M.; Ajayi, A. E.; Giesen, N. V. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. *Biology and Fertility of Soils*, Berlin, v. 39, p. 296-299. 2004.

Pastor-Villegas, J.; Pastor-Valle, J. F.; Meneses Rodríguez, J. M.; García, M. Study of commercial wood charcoals for the preparation of carbon Adsorbents. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Amsterdam, v. 76, p. 103-108, 2006.

Paz, E. J. J.; Souza, L. D. Caracterização física do carvão de cajá (*Spondias mombin* L.). Jornada Científica da EMBRAPA Mandioca e Fruticultura, 2010.

Peake, L. R.; Reid, B. J.; Tang, X. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. *Geoderma*, Amsterdam, v. 235–236, p. 182–190, 2014.

Petter, F. A. Biomassa carbonizada como condicionador de solo: aspectos agronômicos e ambientais do seu uso em solos de cerrado. 2010.130 f. Goiânia: Escola de Agronomia/UFG. 2010. Tese de Doutorado.

Petter, F. A.; Madari, B. E. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 16, p. 761-768, 2012.

Pietikainen, J.; Kiikkila, O.; FritzE, H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus, *Oikos*, Kobenhavn, v. 89, p. 231-242, 2000.

Pimenta, A. S.; Santana, J. A. S.; Anjos, R. M.; Benites, V. M.; Araújo, S. O. Caracterização de ácidos húmicos produzidos a partir de carvão vegetal de duas espécies florestais do semi-árido: jurema preta (*Mimosa tenuiflora*) e pereiro (*Aspidosperma pyrifolium*). *Revista Verde*, Mossoró, v.4, p. 01-11, 2009.

Preston, C. M.; Schmidt, M. W. I. Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions. *Biogeosciences*, v.3, p. 397-420, 2006.

- Rezende, E. I. P.; Angelo, L. C.; dos Santos, S. S.; Mangrich, A. S. Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono. *Revista Virtual de Química*. v.3, p. 426-433, 2011.
- Richards, L. A. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington, U. S. Salinity Laboratory, (USDA. Agriculture handbook, 60. 1954.
- Richards, L. A. *Diagnóstico y rehabilitacion de suelos salinos e sódico*. México: Editorial Limusa, 172 p., 1997.
- Rocha, J. D.; Pérez Mesa, J. M; Corte, L. A. B. Aspectos teóricos e práticos do processo de pirólise de biomassa. UNIFEI. *Energia na Indústria de Açúcar e Álcool*. 2004.
- Rocha, M. de M.; Soares, M. da C.; Freire Filho, F. R.; Ramos, S. R. R.; Ribeiro, V. Q. Avaliação preliminar de genótipos de feijão-caupi para feijão-verde. *Revista Científica Rural*, Bagé, v. 12, p. 153-156, 2007.
- Rondon, M.A.; J. Lehmann, J. Ramirez & M. Hurtado. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions. *Biology and Fertility of Soils*, v. 43, p. 699–708, 2007.
- Rondon, M. A.; Lehmann, J.; Ramírez, J.; Hurtado, M. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions. *Biology and Fertility of Soils*, Berlin, v. 43, p. 699-708, 2006.
- Salomão, L. C. Calibração de tanques evaporímetros de baixo custo sob diferentes diâmetros em ambiente protegido. 2012. 74 f. Botucatu: FCA/UEP. 2012. Tese de Doutorado.
- Santos, D. R.; Gatiboni, L. C.; Kaminski, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 38, p. 576-586, 2008.
- Santos, G. G.; Marchão, R. L.; Silva, E. M.; Silveira, P. M.; Becquer, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 46, p. 1339-1348, 2011.
- Santos, H. G. et al. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa, 353 p., 2013.
- Santos, J. F, dos; Grangeiro, I. T. J.; Brito, C. de; Santos, M do C. C. A. Produção e componentes produtivos de variedades de feijão-caupi na microrregião Cariri paraibano.

Engenharia Ambiental, v. 6, p. 214-222, 2009.

Shindo, H. Elementary composition, humus composition, and decomposition in soil of charred grassland plants. *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 37, p. 651–657. 1991.

Silva, A. C. da; Morais; O. M.; Santos, J. L.; D'arêde, L. O.; Silva, P. B. da. Componentes de produção, produtividade e qualidade de sementes de feijão-caupi em Vitória da Conquista, Bahia. *Revista Agroambiente On-line*. v. 8, p. 327-335, 2014.

Silva, E. F.; Barros-Júnior, A. P.; Silveira, L. M.; Santana, F. M. S.; SANTOS, M. G. Avaliação de cultivares de feijão-caupi irrigado para produção de grãos verdes em Serra Talhada-PE. *Revista Caatinga*, v. 26, p.21-26, 2013.

Silva, J. A. L.; Neves, J. A. Componentes de produção e suas correlações em genótipos de feijão-caupi em cultivo de sequeiro e irrigado. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 42, p. 702-713, 2011.

Singh, B.; Singh, B. P.; Cowie, A. L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Soil Research*, 48: 516-525, 2010.

Skjemstad, J. O.; Clarke, P.; Taylor, J. A.; Oades, J. M.; Mcclure, S. G. The chemistry and nature of protected carbon in soil. *Australian Journal of Soil Research*, v. 34, p. 251-271. 1996.

Smith, N. J. H. Anthrosols and Human Carrying Capacity in Amazonia. *Annals of the Association of American Geographers*, v. 70, p. 553-566, 1980.

Sohi, S. P.; Krull, E.; Lopez-Capel, E.; Bol, R. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 105, p. 47-82, 2010.

Sombroek, W. G.; Nachtergaele, F. O.; Hebel, A. Amounts, dynamics and sequestrations of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio*, v. 22, p. 417-426, 1993.

Souchie, F. F. et al. Carvão pirogênico como condicionante para substrato de mudas de *Tachigali vulgaris* L.G. Silva & H.C. Lima. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 21, p. 811-821, 2011.

Sousa, J. L. M.; Rocha, M. M.; Silva, K. J. D.; Neves, A., C.; Sousa, R. R. Potencial de genótipos de feijão-caupi para o mercado de vagens e grãos verdes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 50, p.392-398, 2015.

- Souza, G. K. A. et al. Growth of cajuru (*Arrabidaea chica* Verlot.) on different growing media. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, Botucatu, v. 8, p. 62-65, 2006.
- Souza, M. S. M. de; Bezerra, F. M. L.; Teófilo, E. M. Coeficientes de cultura do feijão-caupi caupi na Região Litorânea do Ceará. *Irriga*, Botucatu, v. 10, p. 241–248, 2005.
- Steiner, C.; Teixeira, W. G.; Lehmann, J.; Nehls, T.; de Macêdo, J. J. V.; Blum, W. E. H.; Zech, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, The Hague, v. 291, p. 275-290, 2007.
- Steiner, C.; Teixeira, W. G.; Lehmann, J.; Zech, W. Microbial response to charcoal sediments of highly weathered soils and Amazonian Dark Earths in Central Amazônia - Preliminary results. In: Glaser, B.; Woods, W.I. (ED). *Amazonian Dark Earths: exploration in space and time*. Heidelberg: Springer Verlag, p. 195-212, 2004.
- Stewart, H. T. L.; Hopmans, P.; Flinn, D. W. Nutrient accumulation in trees and soil following irrigation with municipal effluent in Australia. *Environmental Pollution*, Amsterdam, v. 63, p. 155-177, 1990.
- Streubel, J. D.; Collins, H. P.; Garcia-Perez, M.; Tarara, J.; Granatstein, D.; Kruger, C. E. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 75, p. 1402-1413, 2011.
- Teixeira, W. G.; Martins, G. C.; Macedo, R. S.; Neves Junior, A. F.; Moreira, A.; Benites, V. M.; Steiner, C. As propriedades físicas e hídricas dos Horizontes Antrópicos das Terras Pretas de Índio na Amazônia Central. In: Teixeira, G.; Kern, D. C.; Madari, B. E.; Lima, H. N.; Woods, W. *As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas*. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, p. 242-250, 2009.
- Topoliantz, S.; Ponge, J. F.; Ballof, S. Manioc peel and charcoal: a potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics. *Biology and Fertility of Soils*, Berlin, v. 41, p. 15-21. 2005.
- Trazzi, P. A. *Uso do carvão vegetal na produção de mudas e no crescimento inicial de Pinus taeda L.* Curitiba/Universidade Federal do Paraná. 117 p, 2014. Tese Doutorado.
- Troeh, F. R.; Thompson, L. M. *Soils and Soil Fertility*, 6. ed. Blackwell, Iowa: Wiley, 489 p.,

2005.

Vaccari, F. P.; Baronti, E. L.; Genesio, L.; Castaldi, S.; Fornasier, F.; Miglietta, F. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *European Journal of Agronomy*, v, 34, p. 231-238, 2011.

Van Zwieten, L.; Kimber, S.; morris, S.; Chan, K. Y.; Downie, A.; Rust, J.; JOSEPH, S.; COWIE, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, v. 327, p. 235-246, 2010.

Verheijen, F.; Jeffery, S.; Bastos, A.C.; Velde, M. van der; Diafas, I. Biochar application to soils: a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. Luxembourg: European Commission, 2010. 149 p.

Werle, R.; Garcia, R. A.; Rosolem, C, A, Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2297-2305, 2008.

Woods, W. I.; Mccann, J. M. El origen y persistencia de las tierras negras de la Amazonía. In: Hiraoka, M. & Mora, S. Desarrollo sostenible en la Amazonía. Mito o realidad? Quito: Ediciones Abya-Yala, p.23-30, 2001.

Zhang, A.; Bian, R.; Pan, G.; Cui, L.; Hussain, Q.; Li, L.; Zheng, J.; Zhang, X.; HAN. X.; YU, X. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles. *Field Crops Research*, v. 127, p. 153-160, 2012.

Zhao, X.; Wang, J.; Wang, S.; Xing, G. Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: a pot experiment with two rice/wheat rotations in paddy soil. *Plant Soil*, Dordrecht, v. 378, p. 279–294, 2014.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ideia de avaliar, em vasos sob ambiente protegido, o efeito dos fatores doses carvão vegetal aplicado a cinco solos de características distintas sobre a qualidade destes solos e sobre a produtividade de feijão-caupi em dois cultivos sucessivos mostrou-se relevante. Apesar de não ser muito marcante, foi confirmado o impacto dos fatores na melhoria das características químicas do solo e no crescimento e produtividade da cultura. Além disso, indicou claramente que o carvão vegetal exerceu influência distinta sobre cada tipo de solo, podendo essas informações gerar importantes implicações agronômicas, como a maior retenção e disponibilidade de nutrientes e água e, conseqüentemente, maior produtividade dos cultivos. Desta maneira, é imprescindível o planejamento para definir o manejo mais adequado para cada característica edáfica a ser considerada.

Ficou comprovado no estudo que houve influência da aplicação de carvão vegetal sobre a capacidade de retenção de água nos vasos, apesar do curto período de interação entre o carvão vegetal e o solo. Isso ressalta a importância de se realizar novos estudos e avaliar esse efeito a longo prazo. Também ficou evidenciado que os solos de textura mais grosseira favoreceram o maior crescimento vegetativo e os solos mais argilosos proporcionaram melhores resultados para os componentes produtivos.

Em relação ao efeito residual do carvão vegetal sobre os atributos químicos e a produtividade de grãos verdes, é importante ressaltar que as avaliações de solos foram realizadas após dois cultivos de feijão-caupi, com cultivares de potenciais genéticos diferentes, mesmo assim houve efeito discreto na fertilidade do solo e, em geral, houve aumento na produtividade com a aplicação de doses crescentes de carvão vegetal, apesar de não atingir a máxima capacidade produtiva da cultivar.

Deste modo, o uso do carvão vegetal como condicionador e ou fertilizante do solo, pode ser considerada uma alternativa no cultivo do feijão-caupi.

Apesar dos avanços obtidos e de ser fonte para futuros trabalhos de pesquisa, deve-se destacar que esta tese não representa um trabalho conclusivo, mas em curso. Durante a sua realização, devido às limitações existentes, houve aspectos que não foram abordados, e que deverão ser objeto de estudo mais aprofundado, principalmente nos seguintes aspectos:

- Realizar novos estudos contemplando maiores doses de carvão vegetal para a recomendação de uma dose de carvão vegetal mais adequada, e avaliar seus efeitos em combinação com fertilizantes, visando atingir produções mais elevadas;
- Aprofundar estudos realizados para avaliar o desempenho do carvão vegetal nos

mesmos solos, em condições de campo, pois os resultados obtidos em ambiente protegido não são aplicáveis diretamente em campo;

- Verificar a viabilidade da utilização de carvão vegetal em nível de propriedade agrícola, enfatizando a sustentabilidade do produtor, pois dependerá da disponibilidade da matéria prima e da técnica de carbonização;
- Avaliar o efeito do carvão vegetal sobre outros atributos químicos e biológicos do solo como: determinação do nitrogênio total, de micronutrientes, da atividade microbiana; o estado nutricional das culturas; a contribuição ambiental, do ponto de vista da redução das emissões de gases causadores do efeito estufa e a fixação de carbono no solo.