

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

CLEENE AGOSTINHO DE LIMA

**CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDROSSEDIMENTOLÓGICA EM
BACIA HIDROGRÁFICA SOB DIFERENTES MANEJOS DO SOLO NO
SEMIÁRIDO**

RECIFE - PE

2018

CLEENE AGOSTINHO DE LIMA

CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM BACIA
HIDROGRÁFICA SOB DIFERENTES MANEJOS DO SOLO NO SEMIÁRIDO

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do Título de Doutorado em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Conservação de água e solo

COMITÊ DE ORIENTAÇÃO:

ORIENTADOR: Prof. Ph.D. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro
Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE

COORIENTADOR: Prof. Cated. João Luís Mendes Pedroso de Lima
Universidade de Coimbra- UC

COORIENTADOR: Prof. Dr. Ricardo José Araújo Miranda
Instituto Federal de Pesca/IFPE

RECIFE – PE

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

L732c Lima, Cleene Agostinho de.
Caracterização hidrológica e hidrossedimentológica em bacia hidrográfica sob diferentes manejos do solo no semiárido / Cleene Agostinho de Lima. – Recife, 2018.
95 f.

Orientador(a): Abelardo Antônio de Assunção Montenegro.
Coorientador(a): João Luís Mendes Pedroso de Lima.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, BR-PE, 2018.
Inclui referências.

1. escoamento superficial 2. Perda de solo 3. Oleaginosas não convencionais perenes 4. Cobertura morta 5. Parcelas experimentais 6. Deslocamento de sementes I. Montenegro, Abelardo Antonio de Assunção, orient II. Lima, João Luís Mendes Pedroso de, coorient. III. Título

CDD 630

CLEENE AGOSTINHO DE LIMA

CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM BACIA
HIDROGRÁFICA SOB DIFERENTES MANEJOS DO SOLO NO SEMIÁRIDO

Tese defendida e aprovada pela Banca Examinadora em: 23/02/2018

ORIENTADOR:

Prof. Ph.D. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro
Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Demetrius David da Silva
Universidade Federal de Viçosa - UFV

Profa. Ph.D. Eunice Maia de Andrade
Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof. Dr. João Audifax César de Albuquerque Filho
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

RECIFE – PE

2018

A Deus pela existência da vida, e ter ajudado a tornar esse sonho realidade. Aos meus pais, Raimundo Felismino de Lima e Francisca Agostinho dos Santos, pelos incentivos aos estudos, conselhos, e apoio em todos os momentos. Aos meus irmãos: Cleide, Cleisce e Cleudo, pelo carinho e apoio. Ao meu noivo Julio Cesar Neves dos Santos, por toda ajuda e amor.

DEDICO

*“O ser humano descobre-se a si mesmo quando se
defronta com os obstáculos”
(Antoine de Saint-Exupéry)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela existência da vida, e ter ajudado a tornar esse sonho realidade.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso de mestrado e doutorado e aprimoramento profissional. Gostaria assim de agradecer a todos os professores desta instituição: Abelardo Montenegro, Elvira Pedrosa, Ceres Duarte, Ênio Farias, Geber Moura, João Audifax Filho, Gerônimo da Silva, Suzana Montenegro, Thais Emanuelle dos Santos e Pabricio Lopes.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa de estudos e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) por meio do Programa Ciência Sem Fronteiras possibilitou a realização do meu doutorado sanduíche na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC). Agradeço também à FINEP pelo apoio financeiro ao desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu orientador professor Abelardo Montenegro uma das referências na conservação de água e solo, pela orientação, incentivo, pela motivação e por ter acreditado e depositado confiança em mim para realização deste trabalho, mas acima de tudo pela amizade construída que ajudou no meu crescimento e amadurecimento pessoal e profissional.

Ao professor João Pedroso de Lima pela coorientação, supervisão e apoio na elaboração deste trabalho, principalmente durante o período de intercâmbio. Agradeço também aos alunos Rafael Abrantes e Babar Mujtaba pelo apoio na realização do experimento laboratorial e amizade.

Ao professor Mateus Filho do departamento de solos da UFRPE, pelo apoio na classificação do solo da área de estudo.

Ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) pela concessão das espécies de moringa e nim utilizadas neste trabalho.

Aos meus pais pelo incentivo aos estudos, mesmo perante as dificuldades e a distância sempre souberam apoiar os meus sonhos. Aos meus irmãos Cleide, Cleisce e Cleudo pelo carinho e apoio.

Agradeço em especial ao meu noivo Julio Cesar Neves dos Santos “orientador” pela ajuda, incentivo, companheirismo e principalmente por ter compreendido a distância.

Ao senhor Malaquias pela disponibilidade da área experimental e por todo apoio na realização dos trabalhos de campo. Agradeço a Wesny pelo apoio no trabalho de campo e coletas dos eventos de chuvas.

Ao Edivaldo Ferreira e Valdemir Júnior pelo apoio na instalação das parcelas experimentais em campo.

À dedicada aluna do curso de Engenharia Agrícola Thayná Almeida, colaboradora ativa do projeto, agradeço pela amizade, assiduidade, comprometimento e apoio no monitoramento experimental e na realização das análises de laboratório.

Aos colegas de pós-graduação, pela amizade, descontração, aprendizagem em grupo. Em especial, a minha turma de doutorado em Engenharia Agrícola: Luiz Antônio, Jairo Cordeiro, Miguel Guimarães e Breno.

Aos colegas do Laboratório de Água e Solo (LAS) pela amizade, momentos de aprendizagem, descontração, trabalhos de campo, laboratório, participação em congressos: Prof^o Abelardo Montenegro, Valdemir Júnior, Robertson Fontes Júnior, José Roberto, Eduardo Silva, Júlio José, Adriana Guedes, Adriano Normandia, Carlyne Andrade, Sonny Mateus, Prof^a Ana Marinho, Renato Augusto, Liliane Pinheiro, Thayná Almeida, Fred Mikhail, Roberta Queiroz, Myrta Stherphanny, Vânia Israel, Ailton Carvalho, Iug Lopes, Diego Araújo, Célia Santos, Daniella Pereira.

Ao Grupo de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (GEPEA), em especial: Tatyana Keyty, Raquelle Lira, Janice Coelho, Jucicléia Soares, Tatiana Patrícia, Angela Jessyka, Diogo Rodrigues e Rafael Gomes, pelo convívio e momentos de descontração felizes, que fizeram os meus dias maravilhosos.

À doutora em Fitopatologia Kátia Félix por ter me acolhido em Recife, pela sua amizade e momentos de descontração.

Às companheiras de apartamento Isabel Cesária, Tamires Souza, Cássia da Hora, Mônica Fernandes, Eduarda Cabral, pelo convívio. Em especial, Isabel Cesária (Isa) pela amizade, momentos de descontração e também nas dificuldades se mostrando sempre uma grande amiga.

A todas as pessoas, que de alguma forma, passaram por minha vida e contribuíram na realização deste trabalho. MUITO OBRIGADA!

RESUMO GERAL

O semiárido do Nordeste brasileiro é marcado pelas fortes incertezas quanto à ocorrência de chuvas. Adicionalmente, verifica-se nos últimos anos um aumento de áreas degradadas em função do uso intensivo do solo e da ausência de práticas conservacionistas. Nesta ótica, faz-se necessário o entendimento dos processos erosivos em diferentes comprimentos de parcelas, bem como a análise da influência de coberturas alternativas do solo e a forma como as sementes da vegetação são deslocadas. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivos avaliar a importância do uso de cobertura morta e de espécies de oleaginosas não convencionais perenes, moringa (*Moringa oleifera* Lam.) e nim (*Azadirachta indica* A. Juss.) no controle da erosão do solo em parcelas com diferentes comprimentos, bem como analisar os fatores que influenciam o arraste das sementes dessas espécies por escoamento superficial. O estudo foi realizado em campo em condições de chuva natural e em laboratório com chuvas simuladas (análise de deslocamento de sementes). Em campo, o estudo foi realizado durante os anos de 2016 e 2017 na bacia representativa do Mimoso, localizada no município de Pesqueira-PE. A área de estudo foi composta de nove parcelas de erosão retangulares com 2 metros de largura, e comprimentos de 1, 10 e 20 m. Foram adotados os seguintes tratamentos: presença de oleaginosas; oleaginosas + cobertura morta e solo descoberto. As variáveis monitoradas em campo foram: precipitação, escoamento superficial, perdas de solo, umidade do solo, temperatura do solo, características morfológicas de oleaginosas (altura de planta e diâmetro caulinar). Em laboratório, foram investigados os efeitos da morfologia das sementes, intensidades das chuvas, padrões de precipitação e declive superficial no transporte de sementes de moringa e nim. Ensaios laboratoriais foram realizados com 27 sementes de cada espécie, distribuídas na superfície do solo descoberto e com cobertura morta, utilizando um simulador de chuva e um canal de terra retangular. Simularam-se intensidades de chuva (45-270 mm h⁻¹) e padrões (uniformes, avançados e atrasados) em uma variedade de inclinações da superfície de 10, 30, 50 e 70%. Nas parcelas de erosão de 1 m de comprimento, independentemente da cobertura do solo, maiores foram as lâminas de escoamento e as perdas de solo, em relação às parcelas de 10 e 20 m de comprimento. Já as parcelas de 20 m de comprimento representaram melhor as heterogeneidades do sistema, relevo e dos processos erosivos. O desenvolvimento da estrutura arbórea vegetal das oleaginosas diminuiu o impacto das gotas de chuva no solo, possibilitando menores perdas de água e solo, quando comparado ao solo descoberto. Nas parcelas sob chuva simulada em laboratório, os deslocamentos e perdas de sementes por escoamento aumentou com a intensidade da chuva e a inclinação da superfície, e diminuiu com o uso da cobertura morta. Este estudo constata que a aplicação de cobertura morta como técnica de controle de erosão e o uso de sementes pesadas e planas ajudam na restauração da vegetação em declives acentuados altamente propensos à erosão do solo.

Palavras-chave: Escoamento superficial. Perda de solo. Oleaginosas não convencionais perenes. Cobertura morta. Parcelas experimentais. Deslocamento de sementes.

GENERAL ABSTRACT

Semi-arid region of the Brazilian Northeast is marked by strong uncertainties regarding the occurrence of rainfall. In addition there has been an increase in degraded areas in recent years due to the intensive soil use and the lack of conservation practices adaption. In this perspective, it is necessary the understanding of the erosive processes in different spatial scales of measurement, as well as the influence of alternative coverage of the soil and the way the seeds of the vegetation are displaced. In this context, the present study aims to evaluate the importance of the use of mulch and nonconventional oilseed perennial species, moringa (*Moringa oleifera* Lam.) and neem (*Azadirachta indica* A. Juss.) for soil erosion control in experimental plots with different lengths, as well as the factors that influence the displacement of the seeds of these species by surface runoff. The study was carried out in the field under natural rainfall and in the laboratory under simulated rainfall (seed displacement analysis). In the field, the study was carried out during the years 2016 and 2017 in the representative basin of Mimoso, located in the municipality of Pesqueira-PE. The study area was composed of nine rectangular erosion plots with 2 meters wide, being distributed in three plots with lengths of 1; 10 and 20 m. The following treatments were adopted: presence of oleaginous; oleaginous + mulch and bare soil. The variables monitored in the field were: precipitation, surface runoff, soil losses, soil moisture, soil temperature, morphological characteristics of oleaginous plants (plant height and stem diameter). In the laboratory, the effects of seed morphology, rainfall intensities, precipitation patterns and surface slope on the transport of moringa and neem seeds were investigated. Laboratory tests were performed with 27 seeds of each species distributed on the soil surface of the bare soil treatment and or the soil with mulch, using a rain simulator and a rectangular earth channel. Different intensities (45-270 mm h⁻¹) and patterns (uniform, advanced and delayed) were simulated on a variety of surface slopes of 10, 30, 50 and 70%. In erosion plots with 1 m in length, regardless of the soil cover, runoff and soil loss as were reduced larger that at the plots of 10 and 20 m in length. The plots of 20 m in length represented better the heterogeneities of the system, relief and erosion processes. The development of the vegetal tree structure of the oleaginous reduced the impact of the raindrops on the soil, which produced smaller losses of water and soil when compared to the bare soil. In the plots under laboratory simulated rainfall, seed displacements and losses by runoff increased with rainfall intensity and surface slope, and decreased with mulching. This study highlights that the application of mulching as a technique of erosion control and the use of heavy and flat seeds contribute to restore vegetation on steep slopes highly prone to soil erosion.

Keywords: Surface runoff. Soil loss. Nonconventional perennial oleaginous. Mulching. Experimental plots. Seed displacement.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II

| | |
|---|----|
| Figura 1. Localização da área experimental na Bacia do Alto Ipanema no Estado de Pernambuco, Brasil. | 36 |
| Figura 2. Perfil do Neossolo Regolítico da área experimental..... | 37 |
| Figura 3. Tratamentos nas parcelas de erosão estudadas: a) Oleaginosas (T1), b) Oleaginosas + cobertura morta (T2) e c) Solo descoberto (T3). | 39 |
| Figura 4. Esboço de instalação das parcelas de erosão estudadas: Oleaginosas (T1), Oleaginosas + cobertura morta (T2) e Solo descoberto (T3). | 40 |
| Figura 5. Instalação de sensor de umidade do solo e temperatura do solo: a) profundidade do solo; b) TDR e termopar instalado; e c) distância do sensor de umidade ao sistema radicular da planta. | 40 |
| Figura 6. Transplântio das espécies de nim (a) e moringa (b) na área experimental. | 40 |
| Figura 7. Biometria das oleaginosas: a) medição da altura de planta; e b) medição do diâmetro caulinar. | 40 |
| Figura 8. Precipitação, intensidade máxima em trinta minutos (I30) e índice de erosividade (EI30) para os anos de 2016 a 2017, Pesqueira-Pernambuco, Brasil. | 40 |
| Figura 9. Variação temporal da precipitação, umidades média do solo (a) e temperaturas médias do solo e do ar (b) nos diferentes tipos de cobertura do solo estudados: Oleaginosas (T1), Oleaginosas + cobertura morta (T2) e Solo descoberto (T3). | 46 |
| Figura 10. Relações entre umidades médias do solo dos tratamentos T3 com T1 e T2 (a); temperaturas médias do solo da área T3 com T1 e T2 (b); e umidade do solo com temperatura para os tratamentos T1, T2 e T3 (c). | 48 |
| Figura 11. Geração de escoamento em função da precipitação e umidade antecedente do solo para todos os eventos pluviométricos superiores a 2 mm, e os três comprimentos de parcelas estudados, (a) T1- Oleaginosas, (b) T2 - Oleaginosas + cobertura morta e (c) T3 – solo descoberto. | 49 |
| Figura 12. Escoamento total no período estudado nas parcelas de 1 m (a), 10 m (b) e 20 m (c) e perda de solo total, para os eventos erosivos monitorados, nas parcelas de 1 m (d), 10 m (e) e 20 m (f). | 51 |
| Figura 13. Boxplot mostrando a variabilidade dos eventos de escoamento superficial (a) e perda de solo (b), nos diferentes comprimentos e tratamentos estudados | 51 |
| Figura 14. Relações entre escoamento superficial nas parcelas de 10 m/1 m (a) e 20 m/10 m (b) e perdas de solo nas parcelas de 10 m/1 m (c) e 20 m/10 m (d) nos diferentes tratamentos estudados. | 52 |
| Figura 15. Relações entre precipitação e escoamento acumulados (a; b; c) e perdas de solo acumuladas (d; e; f) para os três tratamentos estudados..... | 53 |
| Figura 16. Variação mensal da altura da planta e diâmetro caulinar para as Oleaginosas (T1), Oleaginosas + cobertura morta (T2). AP – Altura de planta; DC – diâmetro caulinar..... | 57 |
| Figura 17. Boxplot para os anos de 2016 e 2017, para as variáveis a) escoamento, b) perda de solo, c) altura da planta e d) diâmetro caulinar. | 59 |

CAPÍTULO III

| | |
|---|----|
| Figure 1. Sketch of the laboratory setup used in the experiments (not to scale): a) Rainfall simulator, soil flume and infrared video camera; b) Position of the seeds in the soil flume before a rainfall simulation. | 70 |
| Figure 2. Scheme of the rainfall events simulated in the experiments: a) Uniform, advanced and delayed patterns, with average intensity of 90 mm h ⁻¹ and 15 min duration, simulated on 10, 30, 50 and 70% slopes; b) Uniform rainfall events with intensities of 135, 180 and 270 mm h ⁻¹ and durations of 10.0, 7.5 and 5.0 min, respectively, simulated on 10% slope; c) Uniform rainfall events with intensity of 45 mm h ⁻¹ and 30.0 min duration, simulated on 70% slope. The non-uniform events were symmetrical, and combined higher and lower rainfall intensities of 112 and 75 mm h ⁻¹ lasting 6 and 9 min, respectively. | 74 |
| Figure 3. Seed displacement in perpendicular and parallel directions to runoff (x-y graphs) and seed washout (circles with arrow) for uniform advanced and delayed rainfall patterns at average intensity of 90 mm h ⁻¹ for the slopes of: a) 10%; b) 30%; c) 50%; d) 70%. Uniform patterns show both bare soil and soil under mulch. Values are averages of 3 repetitions. | 78 |
| Figure 4. Seed displacement in perpendicular and parallel directions to runoff (x-y graphs) and seed washout (circles with arrow): a) Rainfall intensities of 90, 135, 180 and 270 mm h ⁻¹ for 10% slope; and b) Rainfall intensities of 45 and 90 mm h ⁻¹ for 70% slope. Only uniform patterns and bare soil conditions are shown. Values are averages of 3 repetitions. | 79 |
| Figure 5. Seed washout (averages and standard deviations of 3 repetitions) and: a) Rainfall intensity, for 10 and 70% slopes; b) Slope, for uniform, advanced and delayed rainfall patterns at average intensity of 90 mm h ⁻¹ (uniform patterns show both bare soil and soil under mulch). | 80 |
| Figure 6. Runoff and soil loss over time for: a) 90 mm h ⁻¹ rainfall intensity in a uniform pattern, for 10, 30, 50 and 70% surface slope and both bare soil and soil under mulch; b) 90 mm h ⁻¹ average rainfall intensity in an advanced pattern and c) delayed pattern, for 10, 30, 50 and 70% surface slope; d) 90, 135, 180 and 270 mm h ⁻¹ rainfall intensities for 10% surface slope; e) 45 and 90 mm h ⁻¹ rainfall intensities for 70% surface slope. Average values and standard deviation of 3 repetitions. | 86 |
| Figure 7. Relation between seed displacement and: a) Runoff; b) Soil loss. Only the 45 mm h ⁻¹ rainfall event is not shown. Values are averages of 3 repetitions and for 10, 30, 50 and 70% surface slope and mulched soil: uniform, advanced and delayed rainfall patterns and rainfall intensity (all significant at the level of 0.05). | 88 |
| Figure 8. Runoff velocity patterns measured by infrared thermography, for both bare soil and soil under mulch, for different slopes and rainfall intensities. | 89 |
| Figure 9. Relation between seed displacement and runoff velocity for: a) Rainfall intensity of 90 mm h ⁻¹ for 10% slope; b) Rainfall intensity of 90 mm h ⁻¹ for 30% slope; c) Rainfall intensity of 90 mm h ⁻¹ for 50% slope; d) Rainfall intensity of 90 mm h ⁻¹ for 70% slope; e) Rainfall intensities of 90, 135, 180 and 270 mm h ⁻¹ for 10% slope; and f) Rainfall intensities of 45 and 90 mm | |

h^{-1} for 70% slope. In a), b), c) and d) both bare soil and soil under mulch are shown. 90

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Características físicas do solo da área experimental..... | 37 |
| Tabela 2. Médias de altura das plantas (AP) e diâmetro caulinar (DC) das oleaginosas na presença e ausência de cobertura morta para todos os comprimentos de parcelas experimentais..... | 58 |

CAPÍTULO III

| | |
|--|----|
| Table 1. Average moringa and neem seeds' morphological characteristics. | 72 |
| Table 2. Seed displacement (in terms of total distance travelled by the seeds and percentage of seeds) and seed washout (in terms of percentage of seeds) of moringa and neem seeds, for all experimental conditions. Values are averages of 3 repetitions. | 77 |
| Table 3. Mean displacement and standard deviation of moringa and neem seeds for the uniform rainfall intensities of 90, 135, 180 and 270 $mm\ h^{-1}$ for 10% surface slope in bare soil conditions. | 81 |
| Table 4. Mean displacement index and respective standard deviation of Moringa and Neem seeds for 10, 30, 50 and 70% slopes in bare soil and soil under mulch for a rainfall intensity of 90 $mm\ h^{-1}$ in a uniform pattern. | 81 |
| Table 5. Mean displacement Index and respective standard deviation of moringa and neem seeds for the uniform rainfall intensities of 45 and 90 $mm\ h^{-1}$ for 70% surface slope in bare soil conditions (dimensionless). | 81 |
| Table 6. Mean displacement Index and respective standard deviation of moringa and neem seeds for 10, 30, 50 and 70% slopes in bare soil conditions for a rainfall intensity of 90 $mm\ h^{-1}$ in a uniform, advanced and uniform pattern (dimensionless). | 82 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| RESUMO GERAL | 9 |
| GENERAL ABSTRACT..... | 10 |
| ESTRUTURAÇÃO DA TESE..... | 16 |
| CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL | 18 |
| HIPÓTESES | 21 |
| OBJETIVOS..... | 22 |
| Geral..... | 22 |
| Específicos..... | 22 |
| REFERÊNCIAS | 22 |
| CAPÍTULO II – Avaliação de processos erosivos em parcelas de diferentes comprimentos e coberturas alternativas do solo no semiárido | 32 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 33 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS..... | 35 |
| 2.1. Características da área de estudo..... | 35 |
| 2.2. Características do solo..... | 36 |
| 2.3. Características climáticas e dados meteorológicos | 38 |
| 2.4. Parcelas experimentais | 38 |
| 2.5. Coletas realizadas durante os eventos erosivos..... | 41 |
| 2.6. Monitoramento da umidade e temperatura do solo..... | 41 |
| 2.7. Implantação de oleaginosas e características morfológicas das espécies..... | 42 |
| 2.8. Análise dos dados..... | 43 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 43 |
| 3.1. Características das chuvas | 43 |
| 3.2. Efeito da cobertura na umidade e temperatura do solo | 45 |
| 3.3. Efeito da precipitação e umidade antecedente do solo na geração de escoamento..... | 49 |
| 3.4. Efeito do comprimento de parcelas e da cobertura do solo no escoamento superficial e perda de solo..... | 50 |
| 3.5. Desenvolvimento temporal das oleaginosas..... | 57 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 4. | CONCLUSÕES..... | 59 |
| 5. | REFERÊNCIAS | 60 |
| CAPÍTULO III – Comparative evaluation of factors influencing seeds displacement over the soil of nonconventional perennial crops: Moringa (<i>Moringa oleifera</i> Lam.) and Neem (<i>Azadirachta indica</i> A. Juss.)..... | | |
| | | 67 |
| 1. | INTRODUCTION..... | 68 |
| 2. | MATERIALS AND METHODS | 70 |
| 2.1. | Rainfall simulator | 71 |
| 2.2. | Soil flume and soil characteristics | 71 |
| 2.3. | Seed characteristics..... | 71 |
| 2.4. | Experimental procedure..... | 72 |
| 2.5. | Measurements during simulations | 75 |
| 2.6. | Data analysis..... | 75 |
| 3. | RESULTS AND DISCUSSION | 76 |
| 3.1. | Seed washout and seed displacement | 76 |
| 3.2. | Effect of seed morphology | 82 |
| 3.3. | Effect of surface slope | 83 |
| 3.4. | Effect of rainfall characteristics..... | 84 |
| 3.5. | Soil surface cover condition | 85 |
| 3.6. | Runoff and soil loss | 85 |
| 4. | CONCLUSIONS | 90 |
| 5. | ACKNOWLEDGEMENTS | 91 |
| 6. | REFERENCES | 91 |
| CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES | | 95 |

ESTRUTURAÇÃO DA TESE

A Tese está dividida em uma seção introdutória, contendo a hipótese e os objetivos do trabalho, dois capítulos experimentais, e recomendações.

O Capítulo 1 é composto de uma introdução geral, e ampla revisão bibliográfica de estudos nacionais e internacionais, considerando as hipóteses investigadas neste estudo, os objetivos gerais e específicos, e referências.

Os capítulos experimentais 2 e 3 são abordados de forma individual, contendo resumo, abstract, introdução, material e métodos, resultados e discussão, conclusões e referências.

O Capítulo 2, intitulado “Processos erosivos sobre diferentes comprimentos de parcelas e coberturas alternativas do solo no semiárido brasileiro”, objetivou avaliar quantitativamente a importância do uso de cobertura morta e de espécies de oleaginosas não convencionais perenes (*Moringa oleifera* Lam. e *Azadirachta indica* A. Juss.) no controle e na erosão do solo em parcelas experimentais com diferentes comprimentos, e submetida a condições de chuvas naturais. Diante dos resultados, verificou-se que quanto menor o comprimento da parcela (1 m), independentemente da cobertura do solo, maiores foram as lâminas de escoamento e as perdas de solo, em relação às parcelas maiores (10 e 20 m). Já as parcelas de 20 m representaram melhor as heterogeneidades do sistema, do relevo e dos processos erosivos. Pode-se constatar que o desenvolvimento das oleaginosas diminuiu o impacto das gotas de chuva no solo, reduzindo a perda de solo, quando comparado ao solo sem vegetação. Em relação aos anos de estudo, observou-se uma diminuição de 48% das perdas de solo de 2016 para 2017, apesar de neste último ano ter ocorrido uma maior precipitação total.

O Capítulo 3, intitulado “Comparative Evaluation of Factors Influencing Seeds Displacement Over the Soil of Nonconventional Perennial Crops: Moringa (*Moringa oleifera* Lam.) and nim (*Azadirachta indica* A. Juss.)”, aborda o efeito da morfologia das sementes, das características da precipitação, da inclinação superficial e da cobertura superficial do solo, no transporte de sementes de moringa e nim, em um canal de solo sob chuvas simuladas. Diante dos resultados, o transporte de sementes por escoamento aumentou com a intensidade da chuva e a inclinação da superfície e diminuiu com a presença de cobertura morta na

superfície do solo. As sementes de moringa, mais redondas e mais leves, foram mais facilmente transportadas pelo escoamento do que as sementes de nim mais planas e pesadas.

Os resultados desta Tese possibilitam a proposição de novas diretrizes para a recuperação de áreas degradadas no semiárido nordestino, altamente propenso à erosão acelerada do solo, focando na utilização de espécies oleaginosas, com potencial para gerar renda aos moradores do semiárido, no futuro.

As regiões semiáridas são caracterizadas por regime pluviométrico irregular, com chuvas mal distribuídas temporais e espacialmente, e pelas fortes incertezas quanto à ocorrência de chuvas intensas, sendo comuns períodos de secas prolongadas (SANTOS et al., 2016). De acordo com Montenegro e Montenegro (2012), as incertezas associadas à disponibilidade de água para os mais diversos usos tendem a ser elevadas, dificultando o planejamento voltado ao uso racional dos recursos hídricos. Os solos nessas regiões são na sua maioria jovens e rasos (profundidades variando de 0,5 a 2 m), com reduzida capacidade de retenção de água, sendo conveniente a ocorrência de afloramento da rocha matriz (SILVA, 2015; SANTOS et al., 2016).

Em função desses fatores (irregularidade e/ou escassez de chuvas, solos rasos), a investigação detalhada do comportamento climático da região semiárida, bem como dos processos hidrossedimentológicos envolvidos, tornam-se indispensáveis para uma adequada gestão dos recursos naturais e hídricos (MONTENEGRO; RAGAB, 2010). Nesse sentido, os fatores intervenientes de maior relevância nos processos hidrossedimentológicos no semiárido do Nordeste brasileiro (bem como em outras regiões edafoclimáticas similares), são: Erosividade da chuva (SANTOS; MONTENEGRO, 2012; OLIVEIRA; WENDLAND; NEARING, 2013; NEARING et al., 2015; BORRELLI; DIODATO; PANAGOS, 2016; TRINDADE et al., 2016; XIE et al. 2016; NEARING et al., 2017; SANTOS et al., 2017a), umidade do solo (MORBIDELLI et al., 2016; SANTOS et al., 2016; ZHANG et al., 2016; MARTINEZ et al., 2017), cobertura vegetal (RODRIGUES et al., 2013; BORGES et al., 2014; LIMA et al., 2015; SILVA; SANTOS; SANTOS, 2017; ANDRADE et al., 2018), erodibilidade do solo (ALGAYER et al., 2014; MIRZAEI et al., 2017), declividade e comprimento de encosta (SADEGHI; SEGHALEH; RANGAVAR, 2013; PEÑUELA; JAVAUX; BIELDERS, 2015; ZHANG et al., 2018), conectividade hidrológica (CHU; NELIS; REDISKE, 2013; PEÑUELA; JAVAUX; BIELDERS, 2015; COVINO, 2017; PARK; LATRUBESSE, 2017) Além do mais, o aumento na demanda global por alimentos e as mudanças no uso da terra representam uma grande ameaça para a sustentabilidade dos solos e dos recursos hídricos (DLAMINI et al., 2011). A erosão hídrica é um grande problema que provoca a degradação dos solos (CERDAN et al., 2010), ou diminuição da produtividade

(SANTOS; MONTENEGRO; PEDROSA, 2009), as perdas de matéria orgânica (SANTOS et al., 2008), o colapso de sistemas de produção agrícola (MONTENEGRO et al., 2013b), prejuízos econômicos (TELLES; GUIMARÃES; DECHEN, 2011) e tem graves efeitos negativos sobre o uso do solo, a infraestrutura das habitações e a qualidade da água (KINNELL, 2016).

A erosão hídrica tem provocado no Brasil milhões de toneladas anuais de perdas de solo (OLIVEIRA et al., 2010). Em regiões semiáridas do Brasil, a erosão hídrica tem ocasionado degradação dos recursos naturais, especialmente solo e água, decorrente da ação do impacto das gotas da chuva, do escoamento superficial, erodibilidade do solo e também da ação antrópica (SILVA; MONTENEGRO; SANTOS, 2012). Esse processo de degradação do solo é ainda mais preocupante em ambientes como os da região Agreste Pernambucana - Brasil, devido à irregularidade da precipitação nessa região, com chuvas mal distribuídas temporal e espacialmente, e ocorrência de eventos pluviométricos de curta duração, elevada intensidade e alto potencial para desencadear fortes processos erosivos (SANTOS; SILVA; MONTENEGRO, 2010).

Buscando investigar os processos hidrológicos e hidrossedimentológicos, principalmente no nordeste brasileiro, onde as precipitações ocorrem com alta intensidade e curta duração, algumas bacias experimentais foram instaladas objetivando entender esses processos, bem como quantificar as perdas de solo e água. Podem ser citadas a Bacia Experimental do Mimoso-Pesqueira-PE (SANTOS et al., 2008; SANTOS; MONTENEGRO; PEDROSA, 2009; SILVA; MONTENEGRO; SANTOS, 2012; BORGES et al., 2014), a Bacia Experimental de Iguatu-CE (BEI) (RODRIGUES et al., 2013; SANTOS, 2016, 2017a, 2017b; LIMA et al., 2013; ANDRADE et al., 2018), a Bacia Experimental de Sumé (SILVA e SANTOS, 2012) e a Bacia de São João do Cariri –BESJC na Paraíba (SILVA; SANTOS; SANTOS, 2017).

Uma das metodologias para quantificar e caracterizar experimentalmente os processos erosivos é a partir de utilização de parcelas experimentais, as quais podem ter diferentes larguras e comprimentos. Compreender o efeito do comprimento da parcela é importante no planejamento de parcelas de erosão e na modelagem de escoamento e processos de transporte associados (por exemplo, sedimentos, nutrientes e sais). A escala espacial da parcela de erosão afeta os valores de escoamento e perda de solo, uma vez que estes são processos

dependentes da escala devido à variabilidade espacial dos parâmetros físicos solo e da taxa de infiltração, mudanças nos processos de erosão, bem como formação de sumidouros de sedimentos (BOIX-FAYOS, et al., 2006, 2007; BAGARELLO e FERRO, 2010; LEYS et al., 2010; BAGARELLO et al., 2011, BAGARELLO; FERRO; PAMPALONE, 2013; SADEGHI; SEGHALEH; RANGAVAR, 2013; MARTINEZ et al., 2017; SANTOS et al., 2017a). A dependência da escala, no escoamento e erosão implicavam que os resultados observados em uma determinada escala não podem simplesmente ser extrapolados para outra escala.

A recuperação de áreas degradadas com culturas perenes contribui para minimizar a erosão do solo. Adicionalmente, o plantio de oleaginosas exóticas não convencionais perenes como moringa (*Moringa oleifera* Lam.) e nim indiano (*Azadirachta indica* A. Juss.) vêm-se intensificando no semiárido brasileiro, por se adaptarem às condições climáticas da região e às características do solo (OLIVEIRA et al., 2013). A moringa é uma espécie da família Moringaceae, nativa do sul do Himalaia (Índia e Paquistão) e nim é da família Meliceae, nativa do Paquistão, Bangladesh, Birmânia, Índia, Sri Lanka, Malásia e Cuba (ROZINA et al., 2017). Essas espécies têm contribuído para diversificação dos sistemas produtivos na agricultura familiar, representando uma alternativa que promove melhorias ambientais, geração de emprego, e incentivo ao crescimento sócio econômico (SCHAFFEL; LA ROVENE, 2010). Além disso, ambas podem ser utilizadas para fins medicinais e como insumo na produção de biodiesel (BORUGADDA; GOUD, 2012; ROZINA et al., 2017). As sementes da moringa podem ser utilizadas no tratamento de água, enquanto as folhas têm excelente valor nutricional e são consumidas tanto na alimentação humana quanto animal (BORUGADDA; GOUD, 2012).

Além do uso de espécies arbóreas, a utilização de práticas conservacionistas baseadas na adoção de cobertura morta na superfície do solo aumenta a taxa de infiltração, incrementando a umidade do solo e reduzindo a flutuação da temperatura, contribuindo assim para o desenvolvimento das culturas e redução do escoamento superficial e erosão (SANTOS; MONTENEGRO; PEDROSA, 2009; JORDÁN; ZAVALA; GIL, 2010; SANTOS; SILVA; MONTENEGRO, 2010; SANTOS; MONTENEGRO; SILVA, 2011; SHEN et al., 2012; MONTENEGRO et al., 2013a, 2013b; BORGES et al., 2014; LIMA et al., 2015).

Portanto, a concepção de planos visando a reabilitação de solos degradados com base na restauração da vegetação requer a compreensão dos mecanismos associados ao transporte de sementes devido ao escoamento e à erosão do solo (WANG et al., 2014, BOCHET 2015). Vários estudos foram realizados sobre a influência de diferentes fatores no transporte de sementes por escoamento, como a morfologia das sementes (CERDÀ; GARCIA-FAYOS, 1997; GARCIA-FAYOS; CERDÀ, 1997; CERDÀ; GARCÍA-FAYOS, 2002; de LIMA et al., 2006, GARCÍA-FAYOS; BOCHET; CERDÀ, 2010, HAN et al., 2011, WANG et al., 2013), intensidade das chuvas (HAN et al., 2011; YU et al., 2016), declive superficial (CERDÀ; GARCÍA-FAYOS, 1997; GARCÍA-FAYOS; CERDÀ, 1997; de LIMA et al., 2006; EMMERSON et al., 2010; HAN et al., 2011) e cobertura vegetal (AERTS et al., 2006; ISSELIN- NONDEDEU et al., 2006; YU et al., 2016). Esses estudos foram realizados em laboratório usando chuvas simuladas e canais de solo (de LIMA et al., 2006; HAN et al., 2011; WANG et al., 2013), no campo usando chuvas naturais (AERTS et al., 2006; ISSELIN- NONDEDEU et al., 2006; EMMERSON et al., 2010; YU et al., 2016) e chuvas simuladas (CERDÀ; GARCÍA-FAYOS, 1997; GARCÍA-FAYOS; CERDÀ, 1997; CERDA; GARCÍA-FAYOS, 2002; AERTS et al., 2006; GARCÍA-FAYOS; BOCHET; CERDÀ, 2010), e aplicando modelos numéricos (THOMPSON et al., 2014).

Neste contexto, o presente estudo foi realizado em campo sob condições de chuvas naturais e em laboratório sob chuvas simuladas. (I) Em campo, objetivou avaliar quantitativamente a importância do uso de cobertura morta e cultivo de moringa (*Moringa oleifera* Lam.) e nim indiano (*Azadirachta indica* A. Juss.) no controle na erosão do solo em parcelas de erosão com diferentes comprimentos. (II) Em laboratório, teve-se como objetivo avaliar os fatores que influenciam o deslocamento de sementes de moringa e nim sob diferentes perfis de chuva simulada.

HIPÓTESES

O uso de cobertura morta e espécies de oleaginosas não convencionais perenes (*Moringa oleifera* Lam. e *Azadirachta indica* A. Juss.), em encosta degradada contribuirão significativamente no controle dos processos erosivos;

Quanto maior o comprimento de parcelas de erosão maior será a acumulação de escoamento resultando em maior energia para transportar os sedimentos desagregados;

Sementes de oleaginosas como *Moringa oleifera* Lam. e *Azadirachta indica* A. Juss., contribuirão para restauração da vegetação em áreas de declive acentuado altamente propensas à erosão do solo.

OBJETIVOS

Geral

Avaliar a importância do uso de cobertura morta e de espécies de oleaginosas não convencionais perenes (*Moringa oleifera* Lam. e *Azadirachta indica* A. Juss.) no controle na erosão do solo em parcelas experimentais com diferentes comprimentos, bem como os fatores que influenciam no arraste das sementes dessas espécies por escoamento superficial.

Específicos

- i. Investigar a influência do uso de cobertura morta e do cultivo de oleaginosas não convencionais perenes no controle dos processos erosivos;
- ii. Investigar o efeito de diferentes comprimentos de parcelas experimentais no transporte de sedimentos e escoamento superficial;
- iii. Investigar o efeito da morfologia das sementes, intensidades das chuvas, padrões de precipitação e declives superficiais no transporte de sementes de *Moringa oleifera* Lam. e *Azadirachta indica* A. Juss., em experimentos laboratoriais sob chuvas simuladas, com e sem presença de cobertura morta.

REFERÊNCIAS

ALGAYER, B.; WANG, B.; BOURENNANE, H.; ZHENG, F.; DUVAL, O.; LI, G.; LE BISSONNAIS, Y.; DARBOUX, F. Aggregate stability of a crusted soil: differences between crust and sub-crust material, and consequences for interrill erodibility assessment. An

example from the Loess Plateau of China. *European Journal of Soil Science*, v. 65, n. 3, p. 325–335, 2014.

ANDRADE, E. M.; RODRIGUES, R. N.; PALÁCIO, H. A. Q.; BRASIL, J. B.; RIBEIRO FILHO, J. C. Hydrological responses of a watershed to vegetation changes in a tropical semiarid region. *Revista Caatinga*, v. 31, n. 1, p. 161 – 170, 2018.

BAGARELLO, V.; FERRO, V. Analysis of soil loss data from plots of differing length for the Sparacia experimental area, Sicily, Italy. *Biosystems Engineering*, v. 105, p. 411–422, 2010.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PAMPALONE, V. A new expression of the slope length factor to apply USLE-MM at Sparacia Experimental area (Southern Italy). *Catena*, v. 102, p. 21–26, 2013.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; GIORDANO, G.; MANNOCCI, F.; PAMPALONE, V.; TODISCO, F.; VERGNI, L. Effect of plot size on measured soil loss for two Italian experimental sites. *Biosystems Engineering*, v. 108, p. 18–27, 2011.

BOCHET, E. The fate of seeds in the soil: a review of the influence of overland flow on seed removal and its consequences for the vegetation of arid and semiarid patchy ecosystems. *Soil*, v. 1, p. 131–146, 2015.

BOIX-FAYOS, C.; MARTÍNEZ-MENA, M.; ARNAU-ROSALÉN, E.; CALVO-CASES, A.; CASTILLO, V.; ALBALADEJO, J. Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation. *Earth Science Reviews*, v. 78, p. 267–285, 2006.

BOIX-FAYOS, C.; MARTÍNEZ-MENA, M.; CALVO-CASES, A.; ARNAU ROSALÉN, E.; ALBALADEJO, J.; CASTILLO, V. Causes and underlying processes of measurement variability in field erosion plots in Mediterranean conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 32, p. 85–101, 2007.

BORGES, T. K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, SANTOS, T. E. M.; SILVA, D. D.; SILVA JÚNIOR, V.P. Influência de práticas conservacionistas na umidade do solo e no cultivo do milho (*Zea mays* L.) em semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 38, n. 6, p. 1862-1873, 2014.

BORRELLI, P.; DIODATO, N.; PANAGOS, P. Rainfall erosivity in Italy: a national scale spatio-temporal assessment. **International Journal of Digital Earth**, v. 9, n. 9, p. 835–850, 2016.

BORUGADDA, V. B.; GOUD, V.V. Biodiesel production from renewable feedstocks: Status and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 4763-4784, 2012.

CAMMERAAT, L. H. A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 27, p. 1201–1222, 2002.

CERDÀ, A.; GARCIA-FAYOS, P. Seed losses by surface wash in degraded Medi-terranean environments. **Catena** v. 29, p. 73-83, 1997.

CERDÀ, A.; GARCÍA-FAYOS, P. The influence of seed size and shape on their removal by water erosion. **Catena**, v. 48, p. 293– 301, 2002.

CERDAN, O.; GOVERS, G.; BISSONNAIS, Y. LE; VAN OOST, K.; POESEN, J.; SABY, N.; GOBIN, A.; VACCA, A.; QUINTON, J.; AUERSWALD, K.; KLIK, A.; KWAAD, F.J.P.M.; RACLOT, D.; IONITA, I.; REJMAN, J.; ROUSSEVA, S.; MUXART, T.; ROXO, M.J.; DOSTAL T. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. **Geomorphology**, v. 122, p. 167-177, 2010.

CHU, X.; NELIS, J.; REDISKE, R. Preliminary study on the effects of surface microtopography on tracer transport in a coupled overland and unsaturated flow system **Journal of Hydrology**, v. 18, n.10, p. 1241–1249, 2013.

COVINO, T. Hydrologic connectivity as a framework for understanding biogeochemical flux through watersheds and along fluvial networks. **Geomorphology**, v. 277, n. 15, p.133–144, 2017.

de LIMA, J. P.; SIMÕES, N.; REDONDO, J.; LIMA, I. P. Estudo Laboratorial do Deslocamento de Sementes de *Pinus pinea*, *Pinus pinaster* e *Grevillea* sp. sob Ação de Chuva Simulada. **Silva Lusitana**, v. 14, n. 2, p. 219–226, 2006.

DLAMINI, P.; ORCHARD, C.; JEWITT, G.; LORENTZ, S.; TITSHALL, L.; CHAPLOT, V. Controlling factors of sheet erosion under degraded grasslands in the Sloping lands of KwaZulu-Natal, South Africa. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 1711–1718, 2011.

GARCÍA-FAYOS P.; BOCHET, E.; CERDÀ, A. Seed removal susceptibility through soil erosion shapes vegetation composition. **Plant Soil**, v. 334, p. 289–297, 2010.

KINNELL, P. I. A. A review of the design and operation of runoff and soil loss plots. **Catena**, v. 145, p. 257–265, 2016.

HAN, L.; JIAO, J.; JIA, Y.; WANG, N.; LEI, D.; LI, L. Seed removal on loess slopes in relation to runoff and sediment yield. **Catena**, v. 85, p. 12–21, 2011.

ISSELIN-NONDEDEU, F.; REY, F.; BÉDÈCARRATS, A. Contributions of vegetation cover and cattle hoof prints towards seed runoff control on ski pistes. **Ecological Engineering**, v. 27, p. 193-201, 2006.

JORDÁN, A.; ZAVALA, L.M.; GIL, J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. **Catena**, v. 81, p. 77-85, 2010.

LEYS, A.; GOVERS G.; GILLIJNS, K.; BERCKMOES, E.; TAKKEN, I. Scale effects on runoff and erosion losses from arable land under conservation and conventional tillage: The role of residue cover. **Journal of Hydrology**, v. 390, p. 143–154, 2010.

LIMA, C. A.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M.; ANDRADE, E. M.; MONTEIRO, A. L. N. Práticas agrícolas no cultivo da mandioca e suas relações com o escoamento superficial, perdas de solo e água. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 4, p. 697–706, 2015.

LIMA, C. A.; PALACIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; BRASIL, P. P. Characteristics of rainfall and erosion under natural conditions of land use in semi-arid regions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 1222-1229, 2013.

MARTINEZ, G.; WELTZ, M.; PIERSON, F. B.; SPAETH, K. E. PACHEPSKY, Y. Scale effects on runoff and soil erosion in rangelands: Observations and estimations with predictors of different availability. **Catena**, v. 151, p. 161–173, 2017.

MONTENEGRO, A. A. A.; LIMA, J. L. M. P. DE; ABRANTES, J. R. C. B.; SANTOS, T. E. M. Impact of mulching on soil and water conservation in semiarid catchment: simulated rainfall in the Field and in the Laboratory. **Die Bodenkultur**, v. 64, n. 3–4, p. 79–85, 2013a.

MONTENEGRO, A. A. A.; ABRANTES, J. R. C. B.; LIMA, J. L. M. P.; SINGH, V.P.; SANTOS, T. E. M. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. **Catena**, v. 109, p. 139–149, 2013b.

MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G.L. **Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido**. In: GHEYI, H.R.; PAZ, V.P.S.; MEDEIROS, S.S.; GALVÃO, C.O. (eds.). Recursos hídricos em regiões semiáridas. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas, BA: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, cap. 1, p. 25-51, 2012.

MONTENEGRO, A. A. A.; RAGAB, R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study. **Hydrological Processes**, v.24, n.19, p.2705-2723, 2010.

MORBIDELLI, R.; SALTALIPPI, C.; FLAMMINI, A.; CORRADINI, C.; BROCCA, L.; GOVINDARAJU, R. S.; An investigation of the effects of spatial heterogeneity of initial soil moisture content on surface runoff simulation at a small watershed scale. **Journal of Hydrology**, v. 539, p. 589–598, 2016.

NEARING, M. A.; YIN, S. Q.; BORRELLI, P.; POLYAKOV, V. O. Rainfall erosivity: An historical review. **Catena**, v. 157, p. 357–362, 2017.

NEARING, M. A.; UNKRICH, C.; NICHOLS, M. H.; GOODRICH, D.; KEEFER, T. Temporal and elevation trends in rainfall erosivity on a 149 km² watershed in a semi-arid region of the American Southwest. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 3, p. 77–85, 2015.

OLIVEIRA, J. R.; PINTO, M. F.; SOUZA, W. J.; GUERRA, J. G. M.; CARVALHO, D. F. Erosão hídrica em um Argissolo vermelho-amarelo, sob diferentes padrões de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n. 2, p. 140–147, 2010.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: a review. **Catena**, v. 100, p. 139–147, 2013.

OLIVEIRA, F. A.; OLIVEIRA, M. K. T.; SILVA, R. C. P.; SILVA, O. M. P.; MAIA, P. M. E.; CÂNDIDO, W. S. Crescimento de mudas de moringa em função da salinidade da água e da posição das sementes nos frutos. **Revista Árvore**, v. 37, n. 1, p. 79-87, 2013.

PARK, E.; LATRUBESSE, E. M. The hydro-geomorphologic complexity of the Lower Amazon River floodplain and hydrological connectivity assessed by remote sensing and field control. **Remote Sensing of Environment**, v. 198, n. 1, p. 321–332, 2017.

PEÑUELA, A.; JAVAUX, M.; BIELDERS, C. L. How do slope and surface roughness affect plot-scale overland flow connectivity?. **Journal of Hydrology**, v. 528, p. 192–205, 2015.

RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. M.; MENDONÇA, L. A. R. ARAÚJO, J. C.; PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO, E. M. Respostas hidrológicas em pequenas bacias na região semiárida em função do uso do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 312–318, 2013.

ROZINA, ASIF, S.; AHMAD, M.; ZAFAR, M.; NSIR, A. Prospects and potential of fatty acid methyl esters of some non-edible seed oils for use as biodiesel in Pakistan. **Renew. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 687-702, 2017.

SADEGHI, S.H.R.; SEGHALEH, M. B.; RANGAVAR, A. S. Plot sizes dependency of runoff and sediment yield estimates from a small watershed. **Catena**, v. 102, p. 55–61, 2013.

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; GUERREIRO, M. J. S.; MEDEIROS, P. H. A.; PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO NETO, J. R. Effect of dry spells and soil cracking on runoff generation in a semiarid micro watershed under land use change. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 1057–1066, 2016.

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; MEDEIROS, P. H. A.; GUERREIRO, M. J. S.; PALÁCIO, H. A. Q. Land use impact on soil erosion at different scales in the Brazilian semi-arid. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 2, p. 251-260, 2017a.

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; MEDEIROS, P. H. A.; GUERREIRO M. J. S.; PALÁCIO H. A. Q. Effect of Rainfall Characteristics on Runoff and Water Erosion for Different Land Uses in a Tropical Semiarid Region. **Water Resources Management**, v. 31, p. 173–185, 2017b.

SANTOS, J. C. N.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; ARAÚJO NETO, J. R. Runoff, soil loss and soil nutrients in semiarid areas of uncultivated. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p. 813-820, 2011.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A. Erosividade e padrões hidrológicos de precipitação no Agreste Central pernambucano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p.871–880, 2012.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; PEDROSA, E. M. R. Características hidráulicas e perdas de solo e água sob cultivo do feijoeiro no semiárido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 217-225, 2009.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA JR., V. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Erosão hídrica e perda de carbono orgânico em diferentes tipos de cobertura do solo no semiárido, em condições de chuva simulada. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 2, p. 29-34, 2008.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 7, p. 670-679, 2011.

SANTOS, T. E. M.; SILVA, D. D.; MONTENEGRO, A. A. A. Temporal variability of soil water content under different surface conditions in the semiarid region of Pernambuco State. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1733–1741, 2010.

SCHAFFEL, S. B.; LA ROVERE, E. L. The quest for eco-social efficiency in biofuels production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 1663 - 1670, 2010.

SHEN, J. Y.; ZHAO, D. D.; HAN, H. F.; ZHOU, X. B.; LI, Q. Q. Effects of straw mulching on water consumption characteristics and yield of different types of summer maize plants. **Plant, Soil and Environment**, v. 58, p. 161–166, 2012.

SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTEIRO, A. L. N.; SILVA JUNIOR, V.P. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. **Agrária**, v. 10, p. 293-303, 2015.

SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M. Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 27-36, 2012.

SILVA, J. V.; ALECRIM, M. A. B.; SILVA, D. O.; COSTA, C. C.; OLIVEIRA, R. J. Perdas de solo e água por erosão hídrica em floresta equiânea em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 4, p. 579-584, 2010.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Análise das perdas de água e solo em um Vertissolo cromado sob diferentes sistemas de manejo. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 32, n. 2, p. 93–107, 2012.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SANTOS, J. Y.G. Evaluation and modeling of runoff and sediment yield for different land covers under simulated rain in a semiarid region of Brazil. **International Journal of Sediment Research**, 2017 (in press).

TELLES, T.S.; GUIMARÃES, M.F.; DECHEN, S.C.F. The Costs of Soil Erosion. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 287-298, 2011.

THOMPSON, S. E.; ASSOULINE, S.; CHEN, L.; TRAHKTENBROT, A.; SVORAY, T.; KATUL, G. Secondary dispersal driven by overland flow in drylands: Review and mechanistic model development. **Movement Ecology**, v. 2, p. 1–13, 2014.

TRINDADE, A. L. F.; OLIVEIRA, P. T. S.; ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 12, p. 1918–1928, 2016.

XIE, Y.; YIN, S.; LIU, B. Y.; NEARING, M. A.; ZHAO, Y. Models for estimating daily rainfall erosivity in China. **Journal of Hydrology**, v. 535, p. 547–558, 2016.

ZHANG, X.; HU, M.; GUO, X.; YANG, H.; ZHANG, Z.; ZHANG, K. Effects of topographic factors on runoff and soil loss in Southwest China. **Catena**, v. 160, p. 394–402, 2018.

ZHANG, X.; ZHAO, W.; LIU, Y.; FANG, X.; FENG, Q. The relationships between grasslands and soil moisture on the Loess Plateau of China: A review. **Catena**, v. 145, p. 56–67, 2016.

CAPÍTULO II – Avaliação de processos erosivos em parcelas de diferentes comprimentos e coberturas alternativas do solo no semiárido

RESUMO: A região semiárida do Nordeste brasileiro é marcada por elevadas incertezas quanto à ocorrência de chuvas intensas, bem como quanto a anos sequenciados de secas. Esses fenômenos naturais, somado à reduzida utilização de práticas conservacionistas, podem gerar degradação dos solos. Neste contexto, o presente estudo, objetivou avaliar quantitativamente a importância do uso de cobertura morta e espécies de oleaginosas não convencionais perenes (*Moringa oleifera* Lam. e *Azadirachta indica* A. Juss.) no controle da erosão do solo em parcelas de erosão com diferentes comprimentos, em condições de chuvas naturais. O estudo foi realizado durante os anos de 2016 e 2017 na bacia representativa do Mimoso, localizada no município de Pesqueira-PE. A área de estudo foi composta de 9 parcelas de erosão retangulares com 2 metros de largura e, comprimentos de 1, 10 e 20 m, intensamente monitoradas no tocante à intensidade de precipitação, umidade e temperatura do solo, escoamento superficial e produção de sedimentos. Para cada comprimento das parcelas foram adotados os seguintes tratamentos: Oleaginosas; Oleaginosas + cobertura morta e Solo descoberto. Nas parcelas de erosão de 1 m de comprimento, maiores foram as lâminas de escoamento e as perdas de solo, em relação às parcelas de 10 e 20 m de comprimento. Já as parcelas de 20 m de comprimento representaram melhor as heterogeneidades do sistema, relevo e dos processos erosivos. A cobertura do solo com oleaginosas e cobertura morta resultou em maior retenção de umidade do solo, menores valores de escoamento superficial e perdas de solo. O desenvolvimento da estrutura das oleaginosas diminuiu o impacto direto das gotas de chuva no solo reduzindo as perdas de solo, quando comparado ao descoberto.

Palavras-chave: Escoamento superficial. Perda de solo. Oleaginosas não convencionais perenes. Cobertura morta. Parcelas de campo.

ABSTRACT: The semiarid region of the Brazilian Northeast is marked by strong uncertainties regarding the occurrence of extreme rainfall, as well as the occurrence of sequence of years of droughts. These natural phenomena, together with limited use of soil and

water conservation practices, can generate soil degradation. In this context, the present study, aimed at quantitatively evaluating the importance of the use of mulch and non-conventional perennial oleaginous species (*Moringa oleifera* Lam. and *Azadirachta indica* A. Juss.) in soil erosion control in erosion plots with different lengths of plots, under natural rainfall. The study was conducted during the years 2016 and 2017 in the representative basin of Mimoso, located in the municipality of Pesqueira-PE. The study area was composed of 9 rectangular erosion plots with 2 meters wide, being distributed in three plots with plots lengths of 1, 10 and 20 m. For each length of plots the following treatments were adopted: Oleaginous; Oleaginous + mulch and Bare soil, intensively monitored for rainfall intensity, soil moisture and temperature, runoff and sediment production. In the erosion plots of 1 m in length, the main ones were the slides and soil loss, in relation to the plots of 10 and 20 m in length. The 20 m plots in length represented better the heterogeneities of the system, relief and erosion processes. Soil cover with oleaginous species and mulch resulted in higher soil moisture, higher runoff and soil loss. The development of the tree structure of the oleaginous reduced the direct impact of raindrops on the soil surface, controlling the soil losses, when compared to the bare soil.

Keywords: Surface runoff. Soil loss. Nonconventional perennial oleaginous. Mulching. Experimental plots.

1. INTRODUÇÃO

O semiárido do Nordeste brasileiro é marcado pelas fortes incertezas quanto à ocorrência de chuvas intensas (SANTOS et al., 2016). Adicionalmente, a rápida expansão populacional em áreas semiáridas e o uso intensivo do solo, somado a ausência de práticas conservacionistas, vem gerando a degradação acelerada dos solos dessas regiões. Esse processo de degradação do solo é ainda mais preocupante em ambientes como os da região Agreste Pernambucana - Brasil, devido à irregularidade da precipitação nessa região, com chuvas mal distribuídas temporal e espacialmente, e ocorrência de eventos pluviométricos de curta duração, elevada intensidade e alto potencial para desencadear fortes processos erosivos (SANTOS; SILVA; MONTENEGRO, 2010).

Buscando investigar os processos erosivos, principalmente no nordeste brasileiro, onde as precipitações ocorrem frequentemente com alta intensidade e curta duração, algumas bacias experimentais foram instaladas objetivando entender esses processos, bem como quantificar as perdas de solo e água. Podem-se ser citadas a Bacia Experimental do Mimoso-Pesqueira-PE (SANTOS; MONTENEGRO; PEDROSA, 2009; BORGES et al., 2014) a Bacia Experimental de Iguatu-CE (BEI) (RODRIGUES et al., 2013; SANTOS, 2016, 2017a, 2017b; LIMA et al., 2013; ANDRADE et al., 2018), a Bacia Experimental de Sumé e a Bacia de São João do Cariri – BESJC na Paraíba (SILVA et al., 2017).

Compreender o efeito do comprimento da parcela é importante no planejamento de parcelas de erosão e na modelagem de escoamento e processos de transporte associados (por exemplo, sedimentos, nutrientes, sais). Parcelas mais longas devem representar melhor a heterogeneidade dos sistemas naturais, reduzir a desconexão hidrológica dentro dos sistemas, enquanto, parcelas mais curtas são, talvez, mais adequadas para caracterizar rapidamente processos hidrológicos específicos (BOIX-FAYOS, et al., 2006, 2007; BAGARELLO e FERRO, 2010; LEYS et al., 2010; BAGARELLO et al., 2011; BAGARELLO; FERRO; PAMPALONE, 2013; SADEGHI; SEGHALEH; RANGAVAR, 2013; MARTINEZ et al., 2017; SANTOS et al., 2017a) e são menos dispendiosos para construir e manter. No entanto, só podem representar uma fração de toda a encosta ou até mesmo da bacia hidrográfica.

A recuperação de áreas degradadas com culturas perenes contribui para minimizar a erosão do solo. Adicionalmente, o plantio de oleaginosas exóticas não convencionais perenes como moringa (*Moringa oleifera* Lam.) e nim indiano (*Azadirachta indica* A. Juss.) vêm se intensificando no semiárido brasileiro, por se adaptarem às condições climáticas da região e às características do solo (OLIVEIRA et al., 2013). A moringa é uma espécie da família Moringaceae, nativa do sul do Himalaia (Índia e Paquistão) e nim é da família Meliceae, nativa do Paquistão, Bangladesh, Birmânia, Índia, Sri Lanka, Malásia e Cuba (ROZINA et al., 2017). Essas espécies têm contribuído para diversificação dos sistemas produtivos na agricultura familiar, representando uma alternativa que promove melhorias ambientais, geração de emprego, e incentivo ao crescimento sócio econômico (SCHAFFEL; LA ROVENE, 2010). Além disso, ambas podem ser utilizadas para fins medicinais e como possível insumo na produção de biodiesel (BORUGADDA; GOUD, 2012; ROZINA et al., 2017). As sementes da moringa podem ser utilizadas no tratamento de água, enquanto as

folhas têm excelente valor nutricional e são consumidas tanto na alimentação humana quanto animal (BORUGADDA; GOUD, 2012).

Além do uso de espécies arbóreas, a utilização de práticas conservacionistas baseadas na adoção de cobertura morta na superfície do solo, aumenta a taxa de infiltração, incrementando a umidade do solo e reduzindo a flutuação da temperatura, contribuindo assim para o desenvolvimento das culturas e redução do escoamento superficial e erosão (SANTOS; MONTENEGRO; PEDROSA, 2009; SANTOS; SILVA; MONTENEGRO, 2010; SANTOS; MONTENEGRO; SILVA, 2011; SHEN et al., 2012; MONTENEGRO et al., 2013a, 2013b; BORGES et al., 2014; LIMA et al., 2015).

Contudo, poucos são os estudos nas condições semiáridas brasileiras visando entender o comportamento hidrológico em diferentes comprimentos de parcelas de erosão e com coberturas do solo alternativas, de modo a identificar um modelo adequado de uso do solo dessas áreas. Uma vez que a relevância da definição do comprimento ideal das parcelas de erosão, que é crucial na fase de design do trabalho de campo.

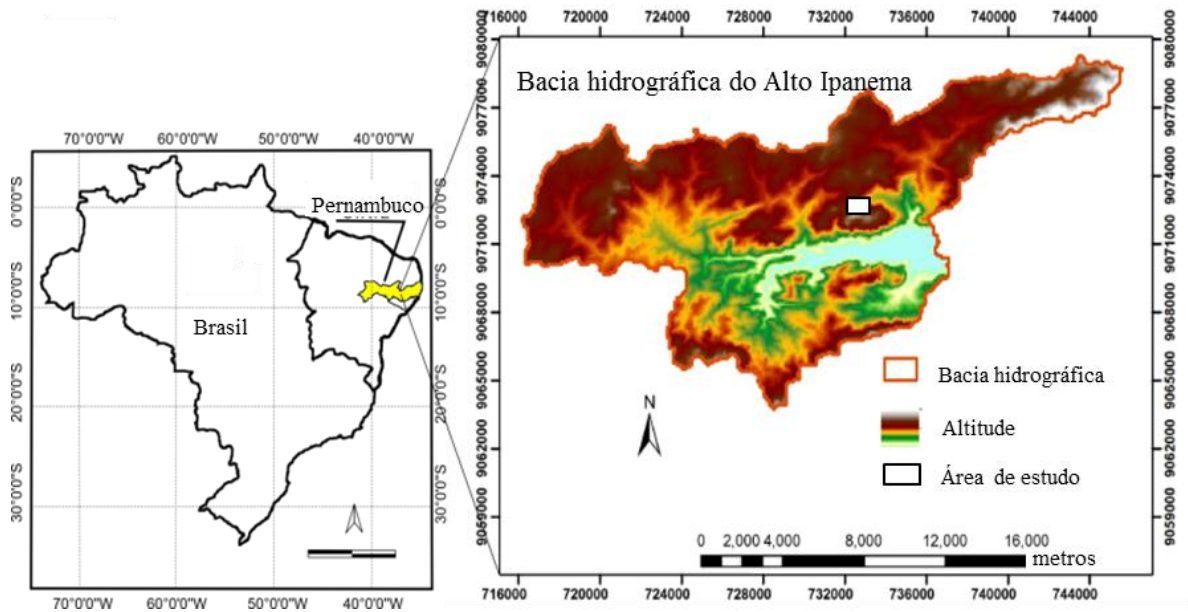
Neste contexto, o presente estudo objetivou avaliar quantitativamente a importância do uso conjunto de cobertura morta e espécies de oleaginosas não convencionais perenes (*Moringa oleifera* Lam. e *Azadirachta indica* A. Juss.) no controle na erosão do solo em parcelas com diferentes comprimentos, em condições de chuvas naturais no semiárido nordestino.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Características da área de estudo

O experimento de campo foi conduzido em uma encosta com área de 0,7 ha, inserida em pequena propriedade rural do Assentamento Nossa Senhora do Rosário, na bacia representativa do Mimoso, localizada no município de Pesqueira-PE, entre as coordenadas geográficas 08°34'17" e 08°18'11" de Latitude Sul e 37°01'35" e 36°47'20" de Longitude Oeste. A bacia do Mimoso é parte da bacia do Alto Ipanema, localizada no semiárido do Estado de Pernambuco (Figura 1), e que se constitui em afluente do Rio São Francisco, em seu trecho sub-médio.

Figura 1. Localização da área experimental na bacia do Alto Ipanema no Estado de Pernambuco, Brasil.



2.2. Características do solo

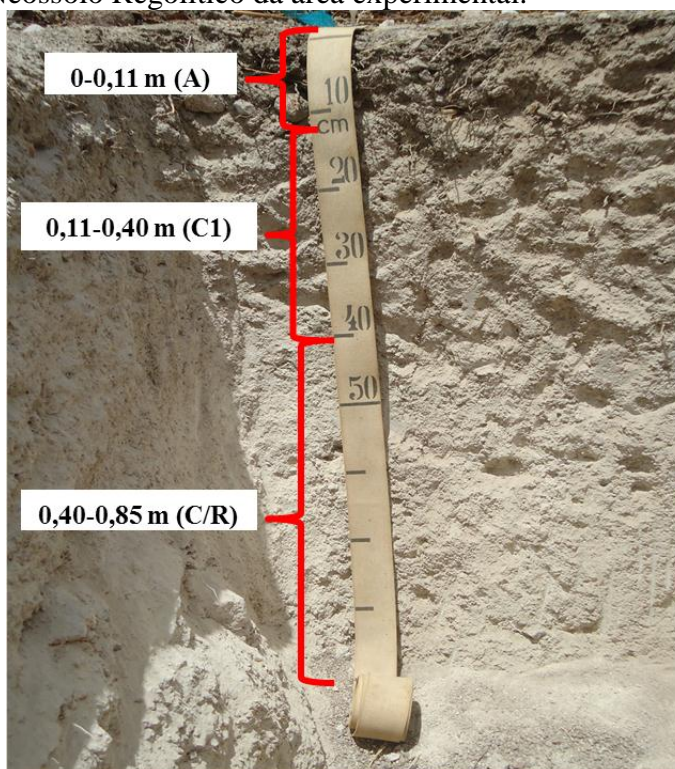
O solo da área de estudo foi classificado, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (EMBRAPA, 2013), como Neossolo Regolítico, relativamente raso, com ~ 0,85 m de profundidade (Figura 2). Já para a caracterização física do solo foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nos horizontes do solo e levadas para o Laboratório de Solos. As características físicas do solo podem ser observadas na Tabela 1. A condutividade hidráulica do solo saturado na camada de 0 a 0,15 m é de ~ 83 mm h⁻¹.

Tabela 1. Características físico-químicas do Neossolo Regolítico da área experimental, Pesqueira-PE.

| Profundidade (cm) | Horizonte | Areia(%)..... | Silte | Argila | Ds (g cm ³)..... | Dp | Pt (m ³ m ⁻³) | Classe textural | | | |
|-------------------|-----------|------------------------|-------|--------|---------------------------------------|------|---|-----------------|---------------------------------------|-------|------------------------------|
| 0-11 | A | 74,8 | 8,2 | 17,0 | 1,41 | 2,72 | 0,48 | Franco Arenoso | | | |
| 11-40 | C1 | 68,4 | 13,3 | 18,3 | 1,55 | 2,53 | 0,39 | Franco Arenoso | | | |
| 40-85+ | C/R | 65,7 | 16,1 | 18,3 | 1,66 | 2,59 | 0,36 | Franco Arenoso | | | |
| Camadas (cm) | Horizonte | pH H ₂ O | Ca | Mg | K | Na | Al | H+Al | P(mg dm ⁻³)..... | C.O | M.O (g kg ⁻¹) |
| 0-11 | A | 6,3 | 5,70 | 2,10 | 0,49 | 0,22 | 0,00 | 3,11 | 23,70 | 13,27 | 22,88 |
| 11-40 | C1 | 4,8 | 1,70 | 0,60 | 0,24 | 0,22 | 0,40 | 3,73 | 1,46 | 3,93 | 6,77 |
| 40-85+ | C/R | 5,7 | 1,70 | 1,30 | 0,12 | 0,40 | 0,10 | 2,75 | 2,06 | 2,31 | 3,98 |

Ds – densidade do solo; Ds – densidade de partículas; Pt – porosidade total; pH – potencial hidrogeniônico em água; Ca – cálcio; Mg – magnésio; K – potássio; N – sódio; Al – alumínio; H+ Al – acidez; P – fósforo; C.O – carbono orgânico; M.O – matéria orgânica

Figura 2. Perfil do Neossolo Regolítico da área experimental.



2.3. Características climáticas e dados meteorológicos

O clima da região é BS (semiárido quente), segundo a classificação de Köppen. A evapotranspiração potencial de referência anual média é de aproximadamente 2.000 mm e a temperatura média anual de 23°C. A precipitação média da região é de 686mm (série de dados de 1910 a 2014).

O período de estudo compreendeu os anos de 2016 a 2017, com coletas de dados concentrados de janeiro a julho, abrangendo a estação chuvosa da região. Os dados de precipitação foram registrados em pluviômetro automático de báscula TB4L da Campbell Scientific, com resolução de 0,254 mm, programado para registrar dados a cada 5 minutos. Os dados de precipitação em escala sub-horária possibilitaram o cálculo, das intensidades médias (I) de cada evento pluvial, e as intensidades máximas em 30 min ($I_{30 \text{ máx}}$). A energia cinética (EC) associada à chuva, foi obtida pela equação proposta por Wischmeier e Smith (1978) e modificada por Foster et al. (1981):

$$EC = 0,119 + 0,0873 \text{ Log } I \quad (1)$$

em que:

EC é a energia cinética das gotas da chuva, em $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$;

I é a intensidade da chuva, em mm h^{-1} .

Os valores obtidos através da equação (1) foram utilizados para o cálculo do índice de erosividade EI_{30} , a partir da equação 2:

$$EI_{30} = EC \times I_{30\text{máx}} \times P \quad (2)$$

em que:

EI_{30} é o índice de erosividade, em $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$;

$I_{30\text{máx}}$ é a intensidade máxima média da chuva em 30 min, em mm h^{-1} ;

P é a altura pluviométrica total, em mm.

2.4. Parcelas experimentais

A área de estudo foi composta de nove parcelas de erosão retangulares de 2,0 m de largura. Foram utilizados três comprimentos de parcela 1, 10 e 20 m, correspondendo a áreas de 2, 20 e 40 m^2 , instaladas em declividades médias de 10, 9,97 e 9,96% respectivamente, com o comprimento da parcela na direção da inclinação (Figura 3). Assim, foram três parcelas

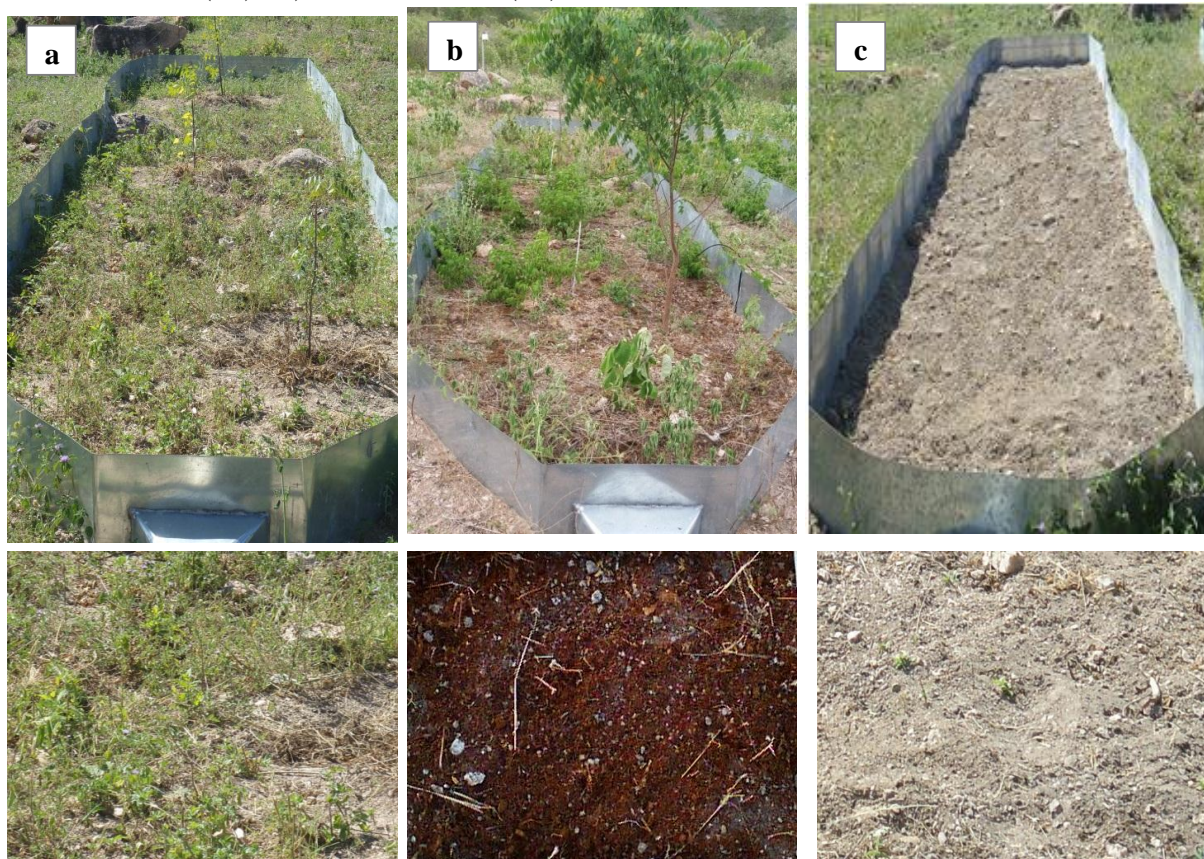
de erosão para cada comprimento, sendo que em cada uma delas, foram aplicados os seguintes tratamentos (Figura 3):

T1 – Oleaginosas não convencionais, moringa (*Moringa oleifera* Lam.) e nim (*Azadirachta indica* A. Juss.), plantadas no espaçamento de 3×3^2 m entre plantas e fileiras.

T2 – Oleaginosas não convencionais com presença de cobertura morta de pó de coco (*Cocos nucifera* L.) sobre a superfície do solo de densidade de 8 t ha^{-1} , sendo as espécies plantadas similares ao tratamento T1.

T3 – Solo descoberto.

Figura 3. Tratamentos nas parcelas de erosão estudadas: a) Oleaginosas (T1), b) Oleaginosas + cobertura morta (T2) e c) Solo descoberto (T3).



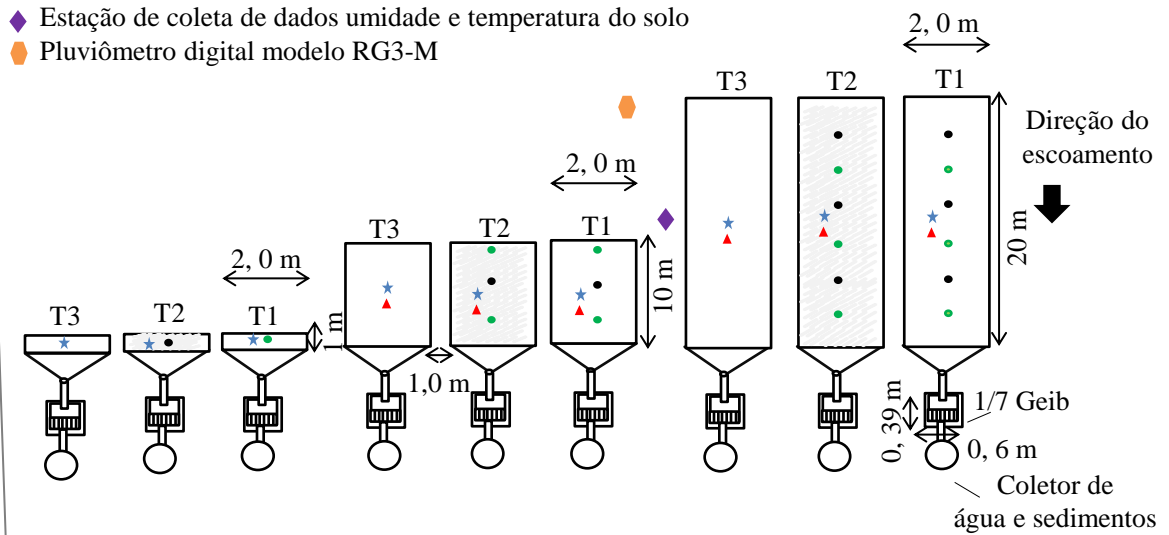
As parcelas foram delimitadas por chapas metálicas de 0,40 m de altura, cravadas no solo a uma profundidade de 0,15 m (Figura 4). Para coleta e quantificação do volume de água escoado superficialmente e das perdas de solo, nas partes inferiores das parcelas foram

instalados sistemas coletores de água e sedimentos, constituído de divisor tipo Geib (com 7 saídas, sendo previamente nivelado e calibrado) e tanque de coleta com capacidade de 0,5 m³.

Figura 4. Esboço de instalação das parcelas de erosão estudadas e os respectivos tratamentos: Oleaginosas (T1), Oleaginosas + cobertura morta (T2) e Solo descoberto (T3).



- Moringa
- Neem
- ★ Sonda de umidade do solo
- ▲ Sensor de temperatura do solo
- ◆ Estação de coleta de dados umidade e temperatura do solo
- Pluviômetro digital modelo RG3-M



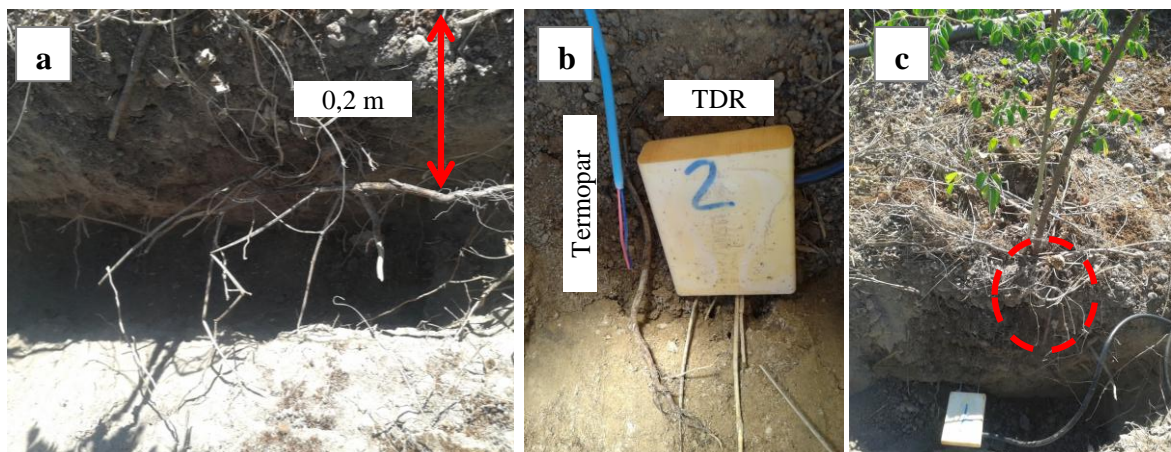
2.5. Coletas realizadas durante os eventos erosivos

O escoamento e a perda de solo foram monitorados durante todos os eventos individuais erosivos (que geraram escoamento) na estação chuvosa (entre janeiro e julho) dos anos de 2016 e 2017. As amostras de água e sedimento (três por cada evento) foram coletadas em potes plásticos, encaminhado para o laboratório de Água e Solo (LAS), em seguida, foi realizada a pesagem do material coletado na enxurrada, mantidos em repouso por 24 horas, o sobrenadante foi pipetado, e separado do material sólido restante no fundo dos recipientes. Os potes foram levados para secagem em estufa a 65° C, durante 72 horas, sendo em seguida pesados com o solo, para determinar a perda total de solo do evento, conforme recomendações de COGO, (1978).

2.6. Monitoramento da umidade e temperatura do solo

Sondas de umidade CS616 da Campbell Scientific foram utilizadas para monitoramento detalhado da umidade do solo. Para mensuração da temperatura do solo, foram utilizados termopares. Esses sensores foram instalados horizontalmente a uma profundidade de 0,20 m (Figura 5) em cada parcela experimental, sendo conectados a um datalogger CR1000 da Campbell Scientific, com aquisição de dados a cada 1 hora.

Figura 5. Instalação de sensor de umidade do solo e temperatura do solo: a) profundidade do solo; b) TDR e termopar instalado; e c) distância do sensor de umidade ao sistema radicular da planta.



2.7. Implantação de oleaginosas e características morfológicas das espécies

O transplantio das espécies de moringa e nim foi realizado em maio de 2015, sendo plantas de moringa e de nim plantadas espaçadas 3,0 m entre as linhas de plantio e 3,0 m entre plantas (Figura 6), nas parcelas experimentais dos tratamentos T1 e T2 (Figura 2). As espécies foram cedidas pela sementeira do Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA). Na preparação das covas incluiu-se hidrogel como fonte de retenção de água no solo.

Figura 6. Transplantio das espécies de nim (a) e moringa (b) na área experimental.



Após 210 dias do transplantio, foi realizado mensalmente o monitoramento das características morfológicas das espécies: Altura da planta (m), obtida através de medição entre a base do caule e o seu ápice, com uso de fita métrica, e o diâmetro caulinar (mm), determinado no colo da planta a uma altura aproximada de 0,15 m, utilizando-se um paquímetro de leitura digital (Figura 7).

Figura 7. Biometria das oleaginosas: a) medição da altura da planta; e b) medição do diâmetro caulinar.



2.8. Análise dos dados

Os dados de escoamento e perda de solo foram analisados por meio de gráficos de boxplot, regressões lineares, logarítmica e potencial. Os dados de altura de planta e diâmetro caulinar foram submetidos à análise de variância (ANOVA), segundo o delineamento inteiramente casualizado com 10 repetições e medidas repetidas no tempo. As médias de altura de planta e diâmetro caulinar em relação aos períodos, entre os tratamentos foram comparadas pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$), utilizando-se o Statistica 9 (STATSOFT inc., 2011).

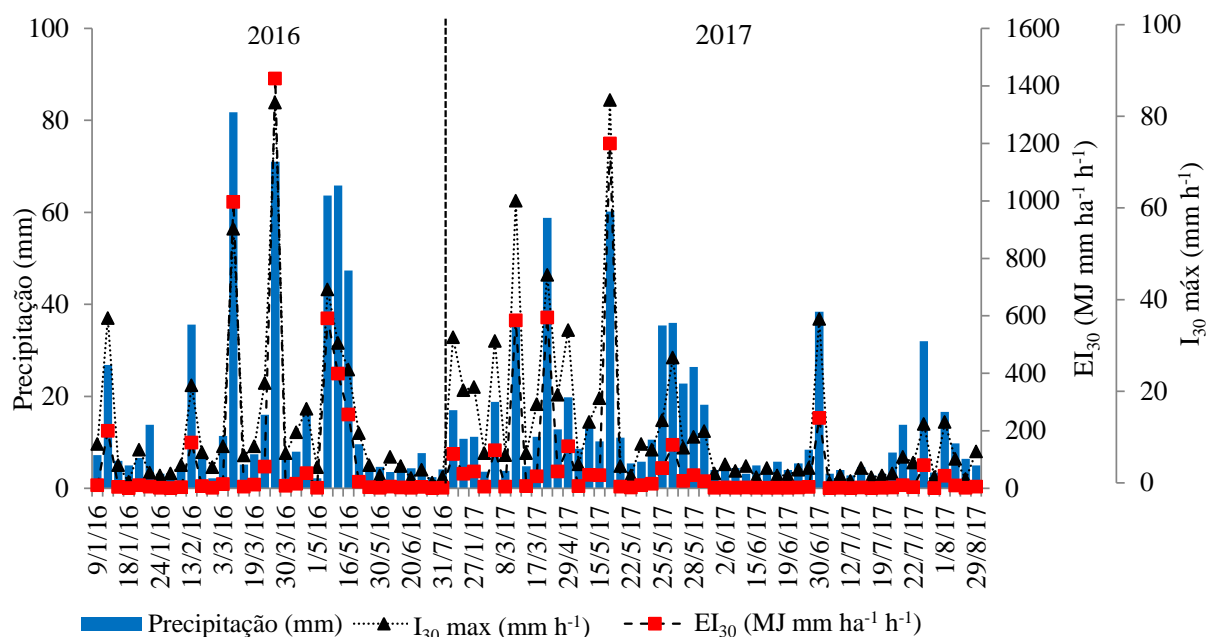
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Características das chuvas

Observa-se na Figura 8 a distribuição dos eventos pluviométricos com as suas respectivas características de erosividade (EI_{30}) e intensidade máxima em 30 minutos (I_{30} máx) para os anos hidrológicos de 2016 e 2017. Os totais precipitados anuais foram de 593 e 751 mm e os índices de erosividade (EI_{30}) de 4.303 e 3.883 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹, respectivamente para 2016 e 2017. O total precipitado em 2016 foi 16% inferior à média histórica de 1910 a 2014 (686mm); já em 2017, o total precipitado foi 9% superior à média da região. Embora no ano de 2017 a precipitação total anual tenha sido maior que a média histórica, o EI_{30} foi 10%

menor do o registrado em 2016. Já em 2016, apesar da ocorrência de um menor número de eventos, estes foram mais intensos e erosivos em comparação com os de 2017 (Figura 8). Eventos pluviométricos de alta intensidade e erosividade (característicos de regiões semiáridas) são responsáveis por maiores perdas de solo, de acordo com Santos et al. (2017a) no semiárido nordestino brasileiro e Boix-Fayos et al. (2005) nas áreas do Mediterrâneo, sendo ainda mais críticos quando o solo apresenta reduzida cobertura (verde ou morta).

Figura 8. Precipitação, intensidade máxima em trinta minutos (I_{30}) e índice de erosividade (EI_{30}) para os anos de 2016 a 2017, Pesqueira-Pernambuco, Brasil.



Os valores de erosividade anual obtidos no presente trabalho (Figura 8) apresentam a mesma ordem de grandeza observada por Oliveira, Wendland e Nearing (2013), estudando a erosividade anual no Brasil. Os referidos autores encontraram valores de EI_{30} variando de 1.672 a 22.452 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Valores mais baixos foram encontrados na região Nordeste por Santos e Montenegro (2012) no Agreste Central pernambucano, com valor de erosividade da chuva para período de 1969-2010 de 2.779 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Santos et al. (2017a) encontraram valores de erosividade variando de 5.718 a 12.642 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ no período de 2009 a 2011, e os valores mais altos foram encontrados na região Norte e na região Sudeste (TRINDADE et al., 2016).

As erosividades do presente trabalho e do Brasil são semelhantes ao intervalo observado em outras regiões tropicais. Nestas regiões os valores de EI_{30} são mais elevados do que os observados em regiões de clima temperado. Nearing et al. (2015), trabalhando na

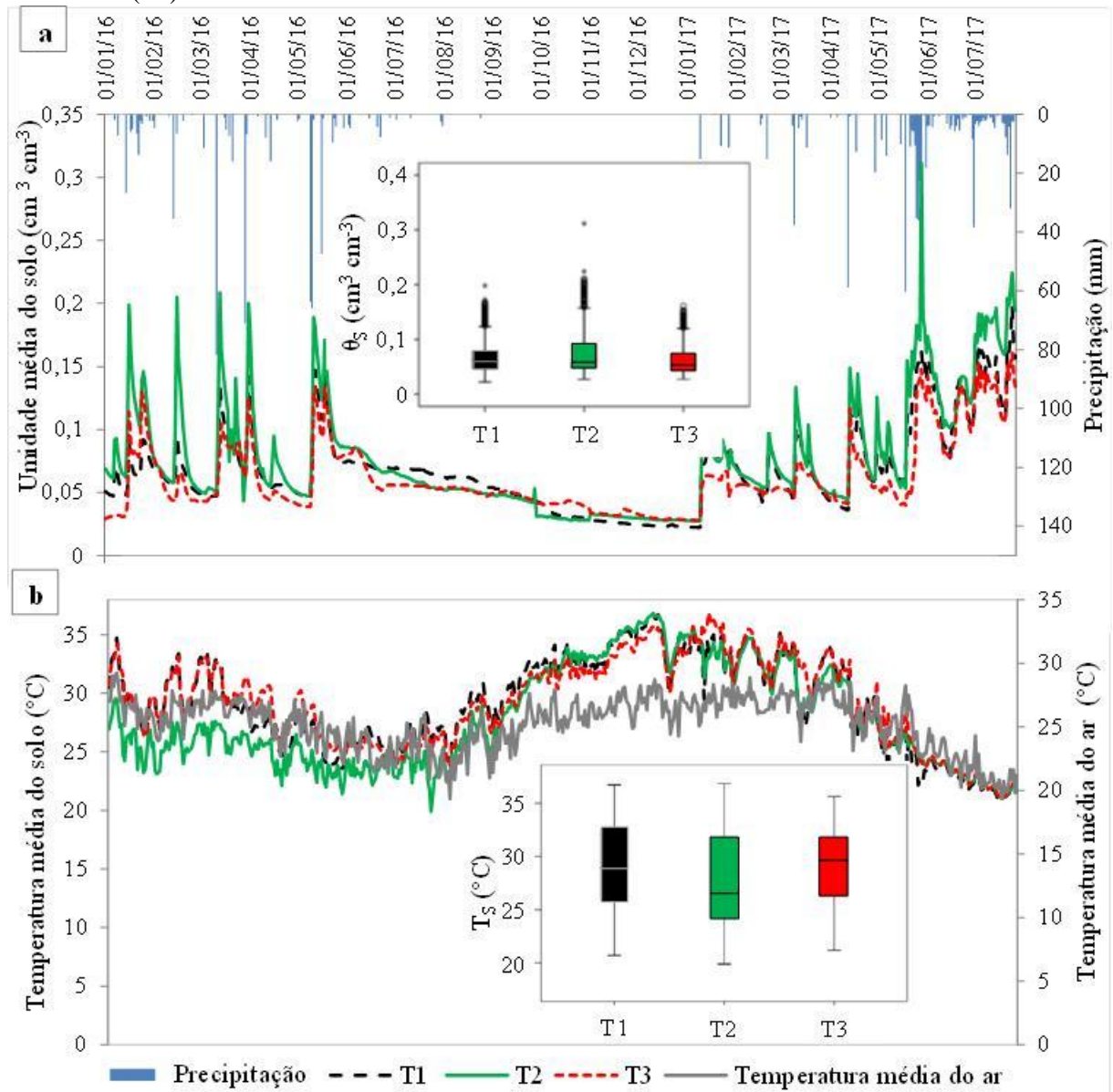
região semiárida do sudeste do Arizona, obtiveram erosividade média anual variando de 950 a 1.225 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, Borrelli, Diodato e Panagos (2016) encontraram valores de erosividade média anual na Itália de 1.715, 2 MJ mm h⁻¹ ha⁻¹ ano⁻¹e, Xie et al. (2016) no leste da China, encontraram valores de 781,9 a 8.258,5 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Os maiores valores de erosividade observados nos trópicos são causados pela alta quantidade de precipitação, intensidade e energia cinética da chuva.

Na Figura 8 ainda é possível observar a alta variabilidade dos eventos, para os anos de 2016 e 2017. Em 2016 houve uma concentração de eventos chuvosos nos meses de março (201 mm) e maio (204 mm). Ambos os meses representaram 68% do total precipitado no ano, sendo os maiores índices pluviométricos concentrados em apenas dois eventos em março (82 e 71 mm) e em maio (64 e 66 mm). Já em 2017, os maiores índices pluviométricos foram registrados no mês de maio (266 mm), o qual representou 35% do total anual precipitado. Neste mês o maior índice pluviométrico ocorreu apenas em um único evento (60 mm).

3.2. Efeito da cobertura na umidade e temperatura do solo

Ao analisar a variação temporal de umidade do solo nos três tratamentos e três comprimentos de parcela (Figura 9a), observam-se maiores umidades do solo no período chuvoso para o tratamento T2 (Oleaginosas + cobertura morta). A vegetação associada à cobertura morta atuou na retenção de água, reduzindo a evaporação, e elevando conseqüentemente a umidade do solo. A introdução de cobertura morta, bem como a associação de barreiras ao escoamento, como pedras, permite maior retenção de água no solo em relação a solos descobertos e com vegetação pouco desenvolvida (SANTOS; SILVA; MONTENEGRO, 2010; SILVA et al., 2015).

Figura 9. Variação temporal da precipitação, umidades média do solo (a) e temperaturas médias do solo e do ar (b) nas parcelas estudadas: Oleaginosas (T1), Oleaginosas + cobertura morta (T2) e Solo descoberto (T3).



Devido à maior retenção de umidade do solo no tratamento T2 em consequência da presença de cobertura morta, foram observadas as maiores amplitudes de umidade neste manejo do solo (Figura 9a). De todo modo, deve-se salientar que as amplitudes máximas de temperatura do solo verificadas (ocorridas na parcela descoberta) são inferiores a 16°C não provocando discrepâncias nas leituras das sondas CS616. Tendo em vista a baixa capacidade de armazenamento de água no Neossolo em estudo, logo após os eventos de chuva havia naturalmente a elevação da umidade do solo, porém em poucos dias (2 a 5 dias) a umidade

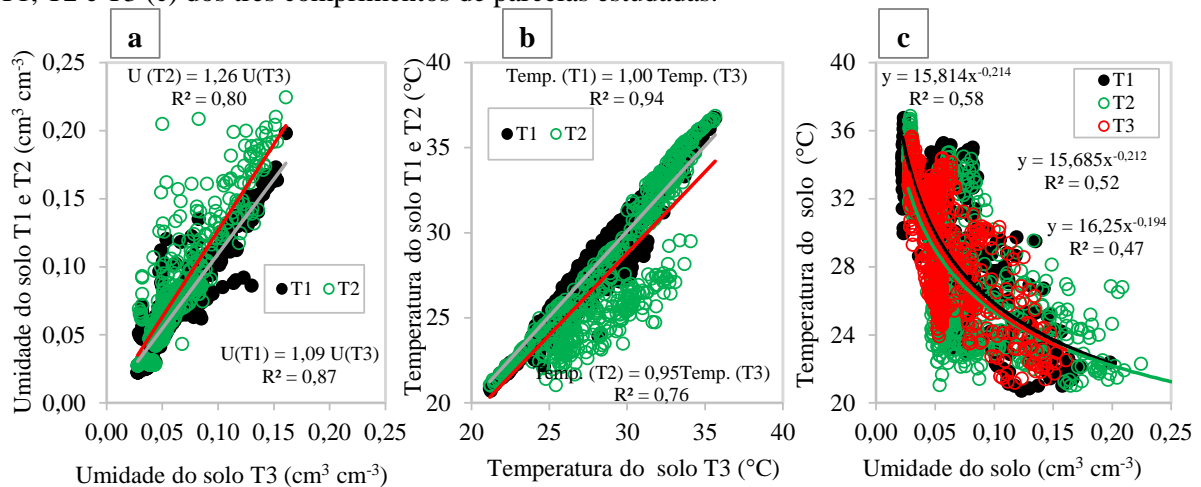
retornava a valores inferiores a $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Assim, valores de umidade do solo após eventos pluviométricos foram classificados como discrepantes nos boxplots (Figura 9a).

No que concerne à temperatura do solo (Figura 9b), observa-se que há uma variação natural com as estações do ano, sendo registrados maiores valores no verão e menores no inverno, com maiores amplitude térmica temporal para o T2 entre 20°C e 37°C , nos dias 22/07/16 e 07/12/16, respectivamente. No período chuvoso de 2016, caracterizado por chuvas de elevada magnitude e espaçadas temporalmente, observa-se que o tratamento T2 apresentou menor temperatura do solo. Esse comportamento pode ser atribuído ao efeito da cobertura morta, resultando em redução da temperatura do solo (também verificado por MONTENEGRO et al., 2013b), devido às perdas de energia via calor latente e sensível. Esse efeito da cobertura T2 em reduzir a temperatura do solo fica mais evidente ao analisar a variabilidade da temperatura média diária (Figura 3b - boxplot), que apresentou menor media e desvio padrão. Assim, constata-se que a cobertura morta reduz a evaporação e aumenta a disponibilidade de água no solo, bem como regula a temperatura do solo (resultado também constatado por Li et al. (2013).

No período de estiagem (out/16 a dez/16), tanto o tratamento T2 como T1 apresentaram menor umidade do solo (Figura 9a), e um aumento de temperatura (Figura 9b). O aumento da temperatura nestes tratamentos foi influenciado pela coloração escura da matéria orgânica, que resulta em menor refletância e maior absorção de radiação solar.

Ao analisar as relações entre umidade do solo no tratamento T3 em relação aos tratamentos (T1 e T2) (Figura 10a), torna-se claro o efeito das coberturas no aumento da umidade do solo. Ao analisar os coeficientes angulares das regressões, tanto o tratamento T1 como o T2 apresentaram valores superiores a 1, indicando a eficiência do manejo na retenção de umidade do solo. O tratamento T2 apresentou maior coeficiente angular do que o T1 (Figura 9a), expressando (Figura 10a) a maior capacidade de retenção de água no solo. Os pontos abaixo da reta 1:1 (Figura 10a), representam os períodos de estiagem (principalmente entre outubro a dezembro), onde a umidade em áreas vegetadas torna-se inferior devida a maior perda por evapotranspiração em comparação com as áreas sem vegetação.

Figura 10. Relações entre umidades médias do solo dos tratamentos T3 com T1 e T2 (a); temperaturas médias do solo da área T3 com T1 e T2 (b); e umidade do solo com temperatura para os tratamentos T1, T2 e T3 (c) dos três comprimentos de parcelas estudadas.



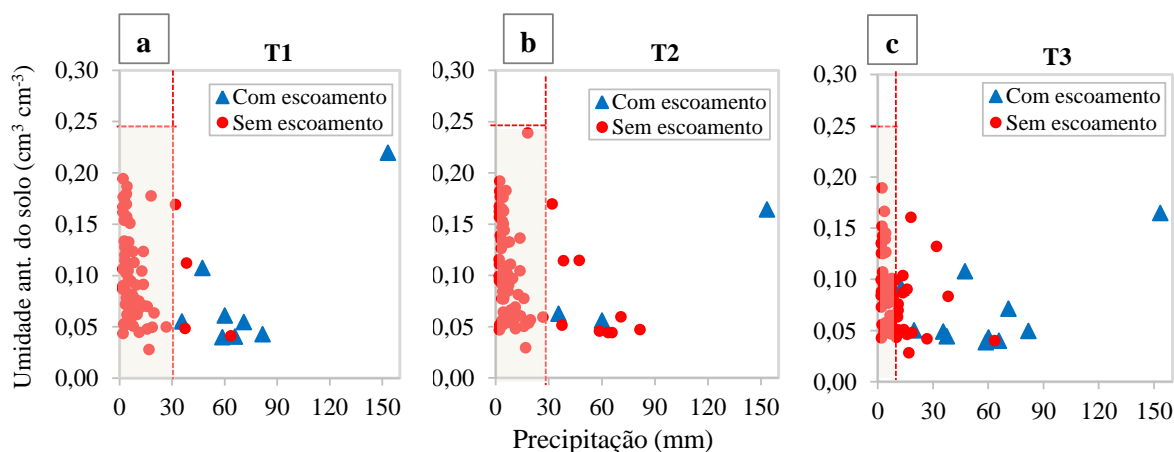
Ao relacionar as temperaturas do solo dos tratamentos T1 e T2 com as temperaturas do solo do tratamento T3 (Figura 10b), pode-se constatar maiores dispersões somente para a relação entre as coberturas T2 e T3. Como no T1 não havia adição da cobertura morta ao solo, o comportamento de umidade e temperatura do solo foi mais similar em relação ao solo descoberto (T1), apresentando coeficientes angulares mais próximos de 1 (Figura 10ab). Na relação de temperaturas de T3 e T2, com a adição de cobertura morta, houve no período chuvoso expressivo aumento de umidade e redução da temperatura do solo. Esse processo gerou dois patamares (Figura 10b) na relação entre temperatura de T2 versus T3, onde no período chuvoso os valores de temperatura eram menores no T2 em relação ao T3. Já no período seco havia uma inversão, com maiores temperaturas no T2 em relação ao T3.

Ao relacionar umidade com temperatura do solo (Figura 10c), para os diferentes tratamentos, constatou-se que quanto maior a umidade há uma tendência de menor temperatura do solo. As maiores dispersões dos dados (Figura 10c) ocorreram para valores de umidade maiores que 0,10 cm³ cm⁻³, uma vez que quanto maior a umidade do solo, menor será a amplitude térmica diária devido ao elevado calor específico da água. Deve-se ressaltar que essa variabilidade nas temperaturas da Figura 10c também pode ser atribuída às estações climáticas do ano, não sendo tão expressivas para a área de estudo devido à proximidade da linha do equador (08°34'17" sul).

3.3. Efeito da precipitação e umidade antecedente do solo na geração de escoamento

Observa-se na Figura 5 que dos 81 eventos de precipitação (>2 mm), apenas 8 eventos geraram escoamento para o tratamento T1, seguido de 3 e 11 eventos para os tratamentos T2 e T3, e nos três comprimentos de parcelas respectivamente (Figura 11). Precipitações inferiores a ~30 mm, no período estudado, não geraram escoamento superficial nos tratamentos T1 e T2, independentemente da umidade antecedente do solo.

Figura 11. Geração de escoamento em função da precipitação e umidade antecedente do solo para todos os eventos pluviométricos superiores a 2 mm, e os três comprimentos de parcelas estudados, (a) T1- Oleaginosas, (b) T2 - Oleaginosas + cobertura morta e (c) T3 – solo descoberto.



Como o solo estudado é um Neossolo Regolítico de textura franco arenosa, a capacidade de retenção de água é pequena, alcançando valores máximos de umidade de $0,24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Figura 11). Adicionalmente, o solo em estudo apresenta elevada condutividade hidráulica saturada, com valores médios de 83 mm h^{-1} . Nesse sentido, a umidade antecedente do solo passa a não apresentar grande influência na geração de escoamento superficial, tendo maior peso nesse processo as características da chuva e o estado da cobertura do solo. A forte dependência do total precipitado e da cobertura do solo na geração de escoamento foram verificados por Santos et al. (2017b). Chuvas superiores a 70 mm geraram escoamento independentemente da umidade antecedente do solo, e quando o solo apresentava umidade superior a 20%, a maior parte dos eventos eram geradores de escoamento superficial (SANTOS et al., 2016).

No tratamento T1 (Oleaginosas) (Figura 11a), observa-se que a não geração de escoamento para três eventos com precipitação superior a 30 mm estão relacionados à baixa

intensidade média da chuva. No T1, os dois eventos de pluviométrico de 38 mm, sem escoamento (Figura 11a), a intensidade máxima da chuva foi de 19 mm h⁻¹. Já para o evento de 64 mm, a intensidade foi ainda menor, com valor de 13 mm h⁻¹. Como o solo em estudo apresenta elevada taxa de infiltração, os picos de intensidade desses eventos não foram capazes de gerar escoamento. Aliado a isso, as plantas atuaram na dissipação da energia cinética da chuva.

No tratamento T2 (Oleaginosas + cobertura morta) (Figura 11b) observa-se que houve um menor número de eventos geradores de escoamento (3 eventos) quando comparado ao T1 (só Oleaginosas) (8 eventos). As oleaginosas associadas a cobertura morta agiu tanto na dissipação da energia cinética da chuva como na retenção de água no solo, e na absorção/intercepção.

No tratamento T3 o número de eventos erosivos passou para 11(Figura 11c). A inexistência de cobertura (tanto morta como de vegetação) reduz expressivamente as barreiras naturais ao escoamento e a dissipação da energia da chuva, aumentando as possibilidades de geração de escoamento (SANTOS et al., 2016; SANTOS et al., 2017a).

3.4. Efeito do comprimento de parcelas e da cobertura do solo no escoamento superficial e perda de solo

Na Figura 12 observou-se um aumento de 726 e 1.140% no escoamento e de 303 e 1.060% nas perdas de solo para parcela de solo descoberto (T3) de 1 m de comprimento, em comparação com as parcelas de 10 e 20 m de comprimento. Enquanto, o tratamento T1 nos três comprimentos (1, 10 e 20 m) reduziu 32, 54 e 61% o escoamento (Figura 12abc), e 84, 90, 95% as perdas de solo respectivamente (Figura 12def), já as oleaginosas e cobertura morta (T2) nos três comprimentos (1, 10 e 20 m) reduziu 50, 81 e 85% o escoamento (Figura 12abc), e 91, 96, 98% as perdas de solo (Figura 12def) respectivamente quando comparado ao solo descoberto. As oleaginosas e a adição de 8 t ha⁻¹ de pó de coco, agiu tanto na dissipação da energia cinética da chuva, como na retenção de água no solo, e na absorção/intercepção. A presença de cobertura morta na superfície do solo aumenta a taxa de infiltração e reduz o pico de escoamento, contribui para o desenvolvimento das culturas, diminui a erosão superficial e incrementou a umidade do solo, além de reduziu a temperatura da superfície do solo (SANTOS et al., 2008; SANTOS; MONTENEGRO; PEDROSA, 2009; SANTOS;

MONTENEGRO; SILVA, 2011; SHEN et al., 2012; MONTENEGRO et al., 2013a, 2013b; BORGES et al., 2014; LIMA et al., 2015).

Figura 12. Escoamento total no período estudado nas parcelas de 1 m (a), 10 m (b) e 20 m (c) e perda de solo total, para os eventos erosivos monitorados, nas parcelas de 1 m (d), 10 m (e) e 20 m (f).

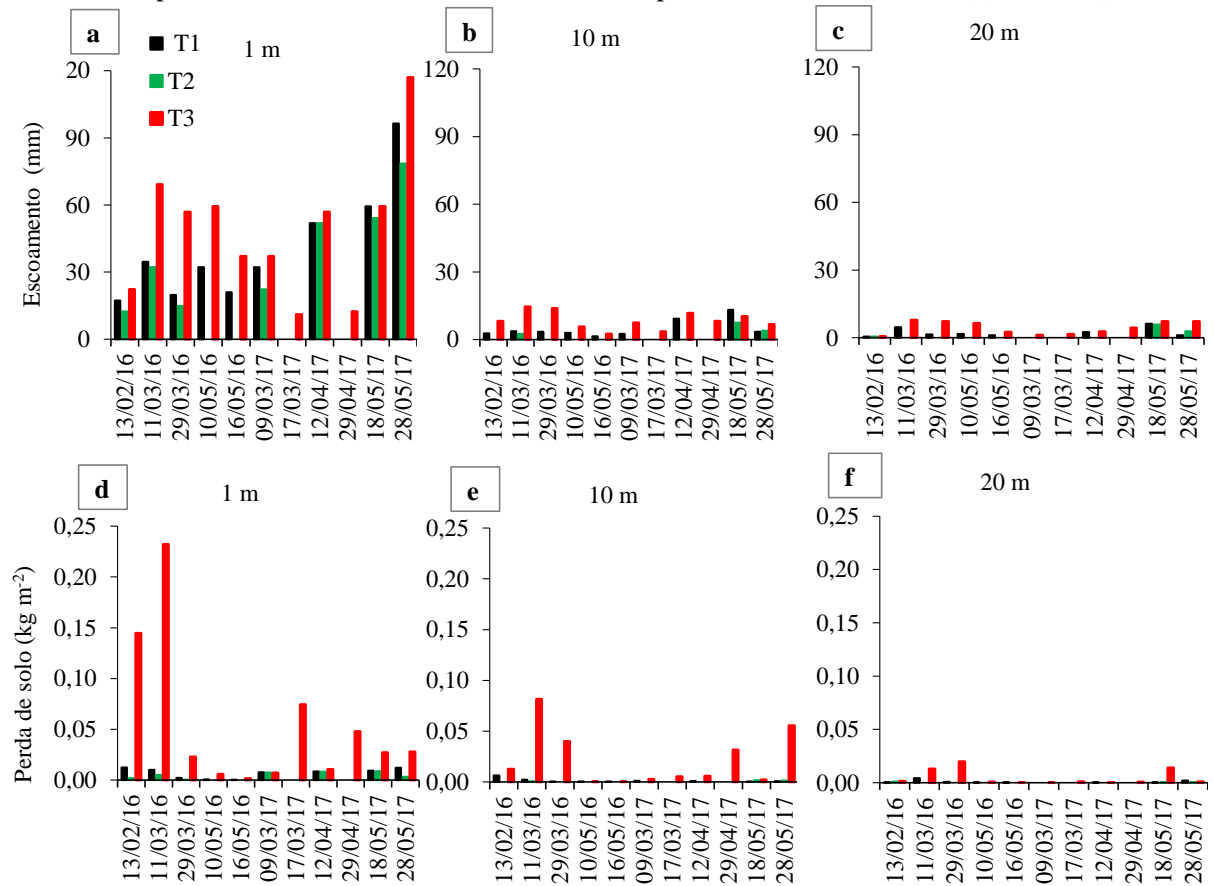
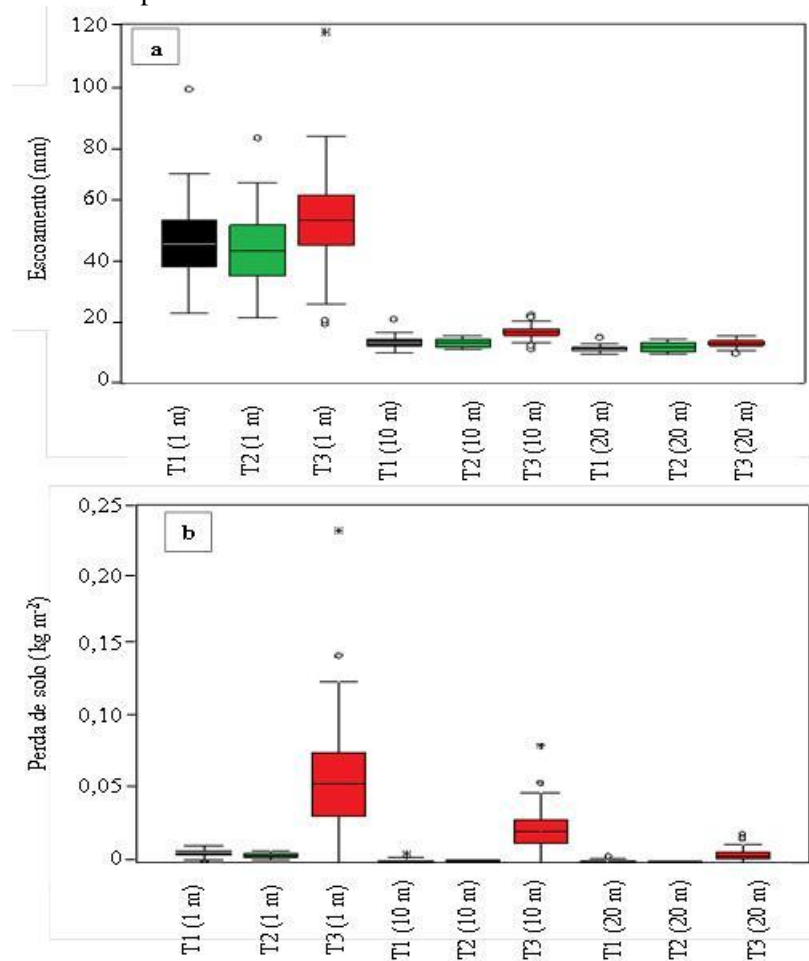


Figura 13. Boxplot mostrando a variabilidade dos eventos de escoamento superficial (a) e perda de solo (b), nos diferentes comprimentos e tratamentos estudados.

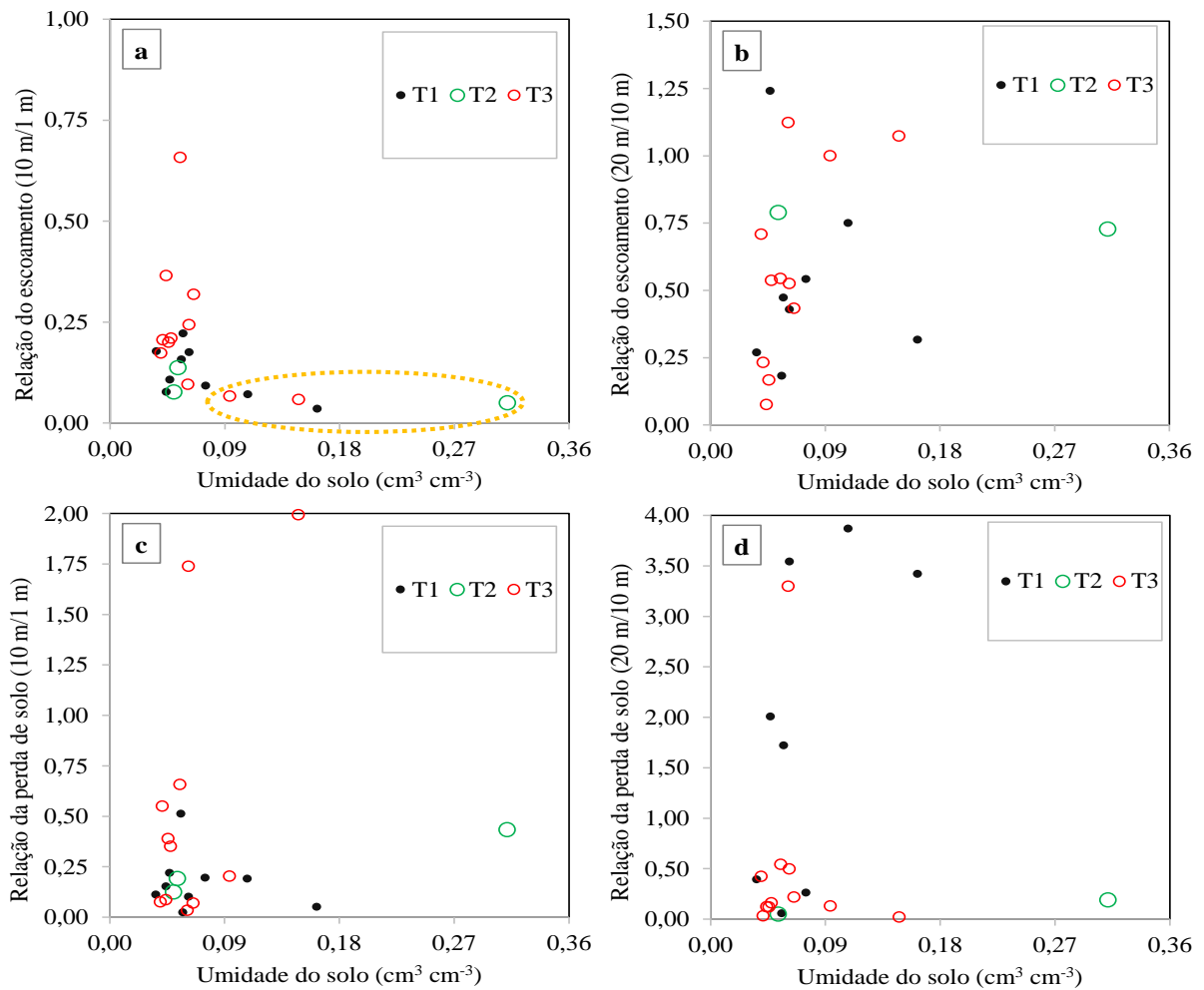


Na parcela de 1 m foi observado coeficientes de escoamento médio de até 84%, e elevada variabilidade das lâminas escoadas e perdas de solo (Figura 13ab). Estes resultados estão de acordo com os resultados de Yair e Kossovsky (2002), Cammeraat (2002), Yair e Raz-Yassif (2004) e Boix-Fayos et al. (2007). Esse comportamento da parcela de 1 m em superestimar os valores, quando comparado com as parcelas de 10 e 20 m, é em função das condições de umidade antecedente do solo (Figura 11). Quando o solo está seco, a resposta do escoamento é variável e na maioria dos casos é semelhante entre as parcelas, porém, quando o solo está úmido, o coeficiente de escoamento é sempre maior nas parcelas de 1 m² do que nas parcelas de 30 m² (BOIX-FAYOS et al., 2007).

Na Figura 14 apresentam-se as relações para o escoamento superficial e perdas de solo para as parcelas de 10 m/1 m e 20 m/10 m. Na Figura 14a e c, podemos observa a relação, ou seja, a divisão entre as perdas de água e solo ocorridas na parcela de 10 m pela a ocorrida na parcela de 1 m. Observa-se para o escoamento, no geral os valores relação foi inferior a 1.

Isso quer dizer que a parcela de 1 m apresenta valores de escoamento superiores ao da parcela de 10 m. Observa-se também que quanto maior for a umidade antecedente do solo menores eram essas relações. Este comportamento é devido a um padrão de umidade do solo mais homogêneo em superfícies menores facilitando a continuidade do fluxo, o que ilustra o papel importante das condições antecedente de umidade do solo na resposta hidrológica (BOIX-FAYOS et al., 2007).

Figura 14. Relações entre escoamento superficial nas parcelas de 10 m/1 m (a) e 20 m/10 m (b) e perdas de solo nas parcelas de 10 m/1 m (c) e 20 m/10 m (d) nos diferentes tratamentos estudados.



Com relação à produção de sedimentos, esse processo é mais complexo, onde 2 eventos nas parcelas de 10 m/1 m (T3) apresentaram valores maior que 1, quer dizer que na parcelas de 10 m as perdas de solo foram maiores em relação a parcela de 1 m. Possivelmente os sedimentos desagregados em eventos anteriores na parcela de 10 m, foram depositados na

parte inferior da parcela e os eventos seguintes conseguiram transportar esses sedimentos de forma mais rápida.

Ainda merece destacar que na parcela 1 m a desagregação de sedimentos é realizada, na maior parte, pelo impacto direto das gotas de chuva, uma vez que com o comprimento reduzido da encosta não há grande acumulação de fluxo e desagregação de partículas de solo fluxo de massa. Assim, como não há acumulação de fluxo de escoamento e pontos de deposição na parcela a maior parte dos sedimentos desagregados são rapidamente transportados para os coletores. Esses processos e a falta de conectividade das parcelas com a encosta já vêm sendo relatado nos trabalhos de Boix-Fayos et al. (2006), destacando como os principais motivos para o esgotamento de sedimentos em parcelas pequenas. Em parcelas de escoamento fechadas, esses processos geram selamento superficial e esgotamento dos sedimentos para o transporte (BOIX-FAYOS et al., 2006), nesse sentido a continuação de estudos de erosão por vários anos na mesma parcela poderá mascarar os valores reais, minimizando os valores de perda de solo e maximizando os valores de escoamento.

Quando passa a comparar as perdas de água e solo ocorridas nas parcelas de 20 m/10 m Figura 14bed, também é frequente relação inferior a 1. Porém existe maior ocorrência de eventos superior a 1, esses eventos são os que havia deposição de sedimentos e uma maior homogeneidade da umidade do solo.

Ao analisar a parcela de 10 m (Figura 14), verificaram-se maiores valores de escoamento e perdas de solo em comparação com a de 20 m (com exceção de três eventos no tratamento T3 e um no tratamento T1, Figura 14b). Esse comportamento deve-se ao fato que quanto maior for a parcela de erosão maior será a representatividade de heterogeneidade do sistema e dos processos. Quanto maior a área de mensuração e com o aumento do comprimento das vertentes, maiores serão as chances da presença de pontos de elevada capacidade de infiltração, aumenta a possibilidade de infiltração do escoamento gerado a montante (CHAPLOT; LE BISSONNAIS, 2000), diminuindo o escoamento e a energia para transportar sedimentos. A produção de sedimentos é limitada à energia disponível para o transporte de sedimentos, que por sua vez, é dependente da magnitude do escoamento gerado em todas as escalas estudadas (SANTOS et al., 2017a)

Na parcela 10 m já inicia a formação de microcanais, havendo concentração de fluxo de escoamento. Em detrimento a de 20 m, ainda não há a predominância de ponto de deposição de sedimentos e barreiras naturais ao escoamento, já que quanto maior for a área de captação maior será as chances de estes pontos existirem (CAMMERAAT, 2002; SANTOS et al., 2017a). Esse comportamento pode ser observado na Figura 12d, onde a maior parte dos eventos apresentam, para as perdas de solo, relação (20 m/10 m) menor que 1, indicando que a parcela de mensuração de 10 m exporta mais sedimentos em relação a parcela de 20 m. Contudo, quando maior a parcela de erosão, maiores serão as chances de sedimentos desagregados em alguns eventos ser depositados na parte baixa da parcela e facilmente transportados em eventos seguintes (mesmo de menor poder energético).

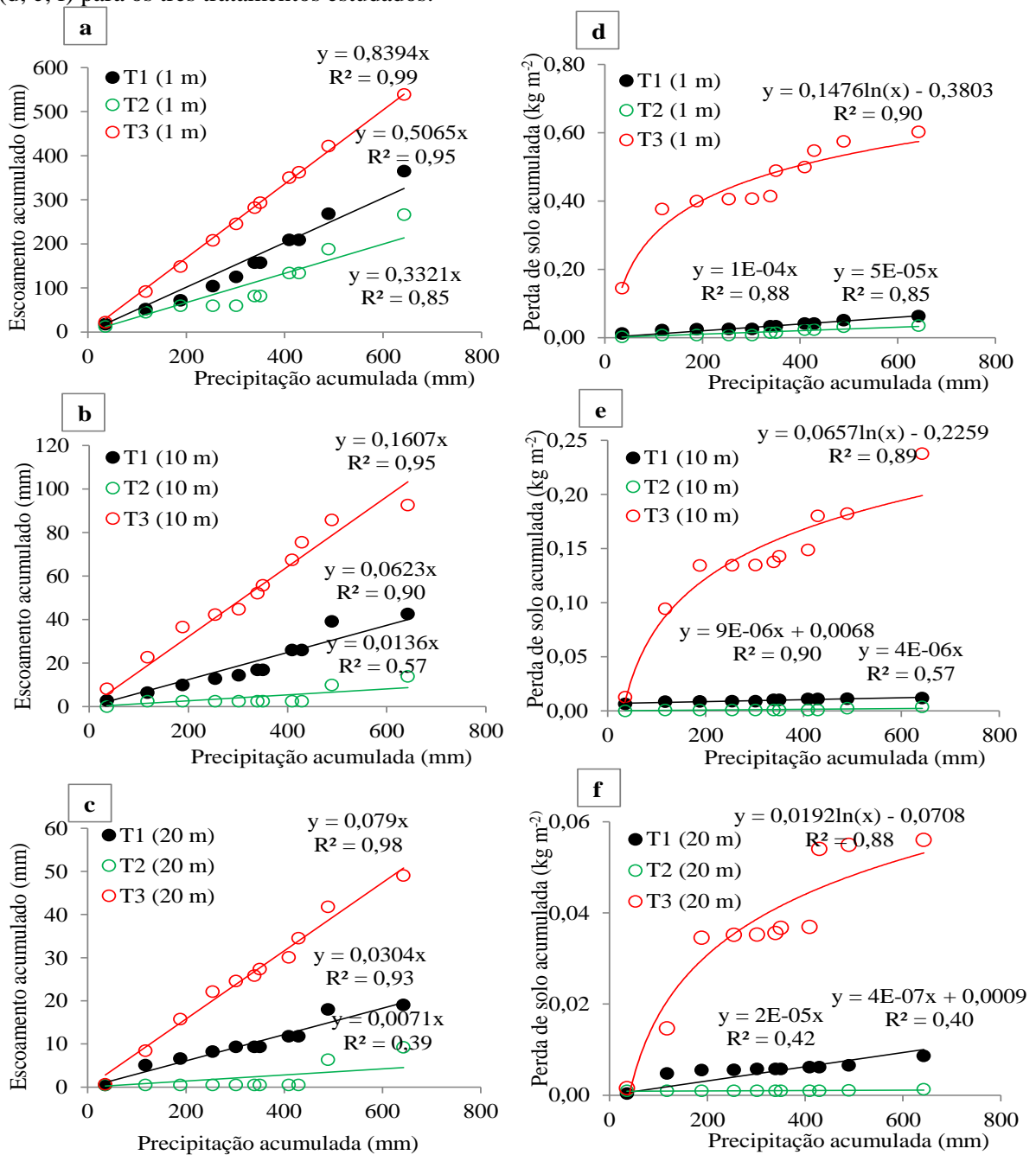
Para esses eventos seguintes a relação (20 m/10 m) pode ser maximizada, sendo uma possível explicação dos eventos com valores superior a 1 na Figura 14d. Esses eventos com relação superior a 1 (Figura 14d) foram mais frequentes na cobertura T1 (oleaginosas), uma vez que a frequente ocorrência de fragmentos de rochas na superfície das parcelas e a presença das plantas formaram pontos temporários de deposição e armazenamentos de sedimentos, que são transportados em eventos seguintes. Destacando que em T2 (oleaginosas + cobertura morta) isso não ocorreu devido ao efeito da cobertura morta em dissipar a energia cinética da chuva, gerando escoamento simultaneamente em apenas dois eventos (nas parcelas de 10 m e 20 m), com escoamento máximo de 5,8 mm (baixa energia para transportar sedimentos).

Ao analisar a relação entre escoamento acumulado e precipitação (Figura 15), verificou-se que o escoamento e as perdas de solo foram muito superiores na parcela de 1 m as demais parcelas de 10 e 20 m, havendo a necessidade do eixo y da Figura 15a ficar 8 e 2,5 vezes maior, respectivamente. Os coeficientes angulares em todos os comprimentos investigados foram $T2 < T1 < T3$, os mesmos expressam que o sistema radicular da vegetação e a decomposição da cobertura morta (pó de coco) agiram na melhoria da estrutura do solo. Tais processos aumentam a condutividade hidráulica do solo e maximizam a oportunidade de infiltração da água da chuva (RODRIGUES et al., 2013), minimizando o escoamento superficial e (ANDRADE et al., 2018). Quanto maior o comprimento da encosta, eventos pequenos podem iniciar o transporte de sedimentos, porém devido à baixa energia de

transporte poderá depositá-los ao longo da vertente, tornando esses sedimentos facilmente disponíveis para o transporte por eventos erosivos subsequentes (SANTOS et al., 2016).

A relação linear que melhor se ajustou os dados de escoamento e perdas de solo, enquanto, aos dados de perdas de solo do T3 a relação logarítmica apresentou o melhor ajuste.

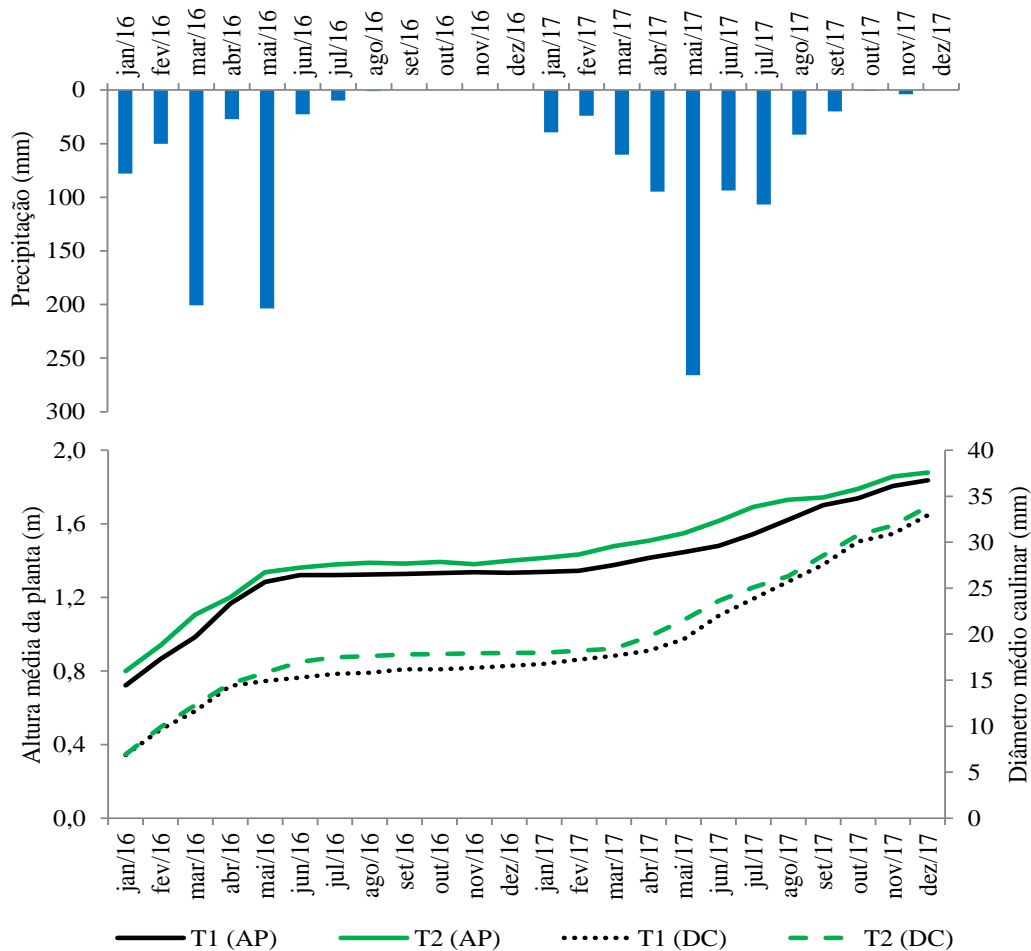
Figura 15. Relações entre precipitação e escoamento acumulados (a; b; c) e perdas de solo acumuladas (d; e; f) para os três tratamentos estudados.



3.5. Desenvolvimento temporal das oleaginosas

Ao analisar o crescimento médio e o diâmetro médio caulinar das oleaginosas, no período de janeiro de 2016 a dezembro 2017, para tratamentos T1 e T2, constatou-se aumento médio na altura das plantas e no diâmetro caulinar (Figura 16). Como o crescimento das plantas é controlado pela divisão celular, uma quantidade de água insuficiente reduz o coeficiente de divisão celular e a expansão de todas as células impedindo, deste modo, o crescimento vegetativo das plantas. No caso da região semiárida, onde existe alta variabilidade dos índices pluviométricos, a cobertura morta é uma técnica conservacionista que permite o melhor aproveitamento da água pelos vegetais (SANTOS; MONTENEGRO; PEDROSA, 2009; BORGES et al., 2014). Merece destacar ainda que no período de estiagem (jul/2016 a dez/2016) houve pouco incremento do desenvolvimento vegetal (Figura 16).

Figura 16. Variação mensal da altura da planta e diâmetro caulinar para as Oleaginosas (T1), Oleaginosas + cobertura morta (T2). AP – Altura de planta; DC – diâmetro caulinar.



Na Tabela 2 pode-se verificar diferença estatística para as variáveis alturas da planta e diâmetro caulinar entre os anos de 2016 e 2017. O rápido desenvolvimento dessas oleaginosas (em condições de sequeiro) é um indicativo de que essas espécies apresentam potencial para recomposição de áreas degradadas no semiárido brasileiro, mesmo na ausência de cobertura morta.

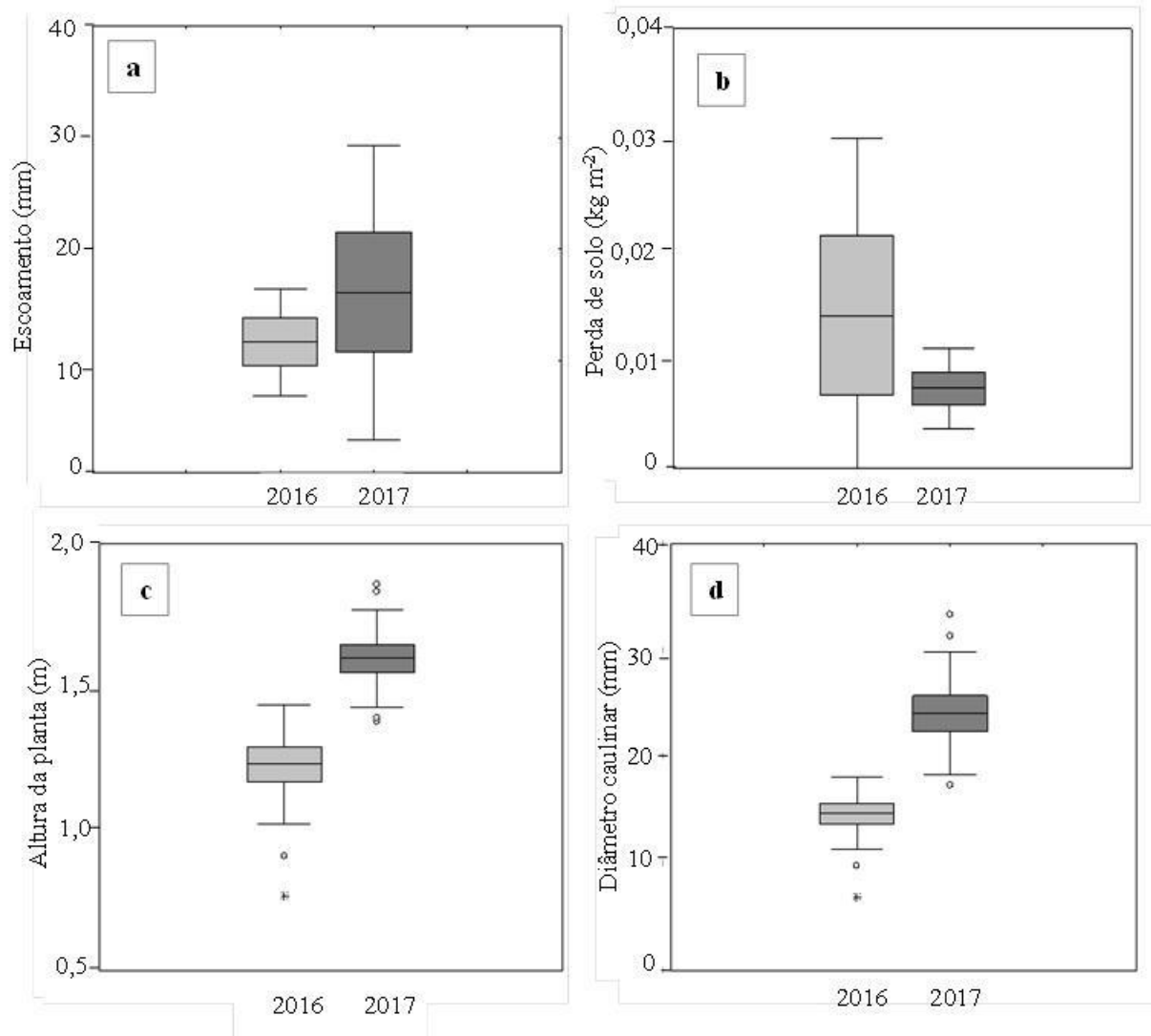
Tabela 2. Médias de altura das plantas (AP) e diâmetro caulinar (DC) das oleaginosas na presença e ausência de cobertura morta para todos os comprimentos de parcelas experimentais.

| Período | T1 (Oleaginosas) | | | | T2 (Oleaginosas + cobertura morta) | | | |
|---------|------------------|---------------|----------|---------------|------------------------------------|---------------|----------|---------------|
| | AP | Desvio padrão | DC | Desvio padrão | AP | Desvio padrão | DC | Desvio padrão |
| 2016 | 1,38 aA | 0,56 | 18,05 aA | 8,34 | 1,45 aA | 0,42 | 19,68 aA | 8,65 |
| 2017 | 1,81 aB | 0,58 | 29,15 aB | 10,73 | 1,85 aB | 0,53 | 30,58 aB | 10,61 |

AP – Altura da planta; DC – diâmetro caulinar. Os valores médios seguidos pela mesma letra minúscula na linha e letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

Na Figura 17b constata-se redução das perdas de solo com o crescimento das plantas de oleaginosas em 2017, em relação ao ano anterior, mesmo com escoamentos mais elevados (Figura 17a). A vegetação mais desenvolvida (Figura 17c, d) diminuiu o impacto direto das gotas de chuva, protegendo o solo. Observou-se uma diminuição de 48% das perdas de solo de 2016 para 2017, motivada também pelo não revolvimento do solo em 2017, concorrendo para sua consolidação superficial. Entretanto, não se observou reduções no escoamento superficial, pois às lâminas escoadas, de modo geral, têm sido menos influenciadas pela cobertura vegetal e morta do que as perdas de solo, também verificado por Cogo; Levien e Schwarz, (2003) em que as perdas de água ficando a depender de condições, tais como: regime de chuva, tipo de solo, topografia e sequência/rotação cultural utilizada no sistema de manejo do solo.

Figura 17. Boxplot para os anos de 2016 e 2017, para as variáveis escoamento (a), perda de solo (b), altura da planta (c) e diâmetro caulinar (d).



4. CONCLUSÕES

Nas parcelas de erosão de 1 m de comprimento, maiores foram as lâminas de escoamento e as perdas de solo, em comparação com as parcelas de 10 e 20 m de comprimento, ressaltando assim o efeito de escala existente na análise de tais processos.

A utilização de parcelas mais longas, tais como parcelas de 20 m investigadas neste estudo, representou melhor as heterogeneidades do sistema, relevo e dos processos erosivos.

Nos três comprimentos (1, 10 e 20 m), os maiores valores para o escoamento e perdas de solo ocorreram no tratamento com solo descoberto, uma vez que o solo sem cobertura não apresenta barreiras naturais ao escoamento e consequente deposição de sedimentos.

A cobertura do solo com oleaginosas e cobertura morta resultou em menores valores de escoamento e perdas de solo comparativamente ao solo descoberto, uma vez que a cobertura agiu tanto na dissipação da energia cinética da chuva como na retenção de água no solo, e na absorção/intercepção.

A umidade antecedente do solo não foi o fator mais expressivo na geração de escoamento superficial para o solo estudado (Neossolo Regolítico), sendo que as condições da cobertura do solo e as características da chuva (altura, intensidade e duração) foram os fatores mais determinantes.

Na parcela com oleaginosas, o desenvolvimento da estrutura arbórea vegetal e o não revolvimento do solo diminuiu a desagregação das partículas, reduzindo a perda de solo. Observou-se uma diminuição de 48% das perdas de solo de 2016 para 2017. Entretanto, não se observou reduções no escoamento superficial.

O rápido desenvolvimento das oleaginosas é um indicativo de que essas espécies podem ser utilizadas na recomposição de áreas degradadas no semiárido brasileiro.

5. REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. M.; RODRIGUES, R. N.; PALÁCIO, H. A. Q.; BRASIL, J. B.; RIBEIRO FILHO, J. C. Hydrological responses of a watershed to vegetation changes in a tropical semiarid region. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 1, p. 161-170, 2018.

BAGARELLO, V.; FERRO, V. Analysis of soil loss data from plots of differing length for the Sparacia experimental area, Sicily, Italy. **Biosystems Engineering**, v. 105, p. 411-422, 2010.

BAGARELLO, V.; FERRO, V. Plot-scale measurement of soil erosion at the experimental area of Sparacia (southern Italy). **Hydrological Processes**, v. 18, p. 141-157, 2004.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PAMPALONE, V. A new expression of the slope length factor to apply USLE-MM at Sparacia Experimental area (Southern Italy). **Catena**, v. 102, p. 21-26, 2013.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; GIORDANO, G.; MANNOCCHI, F.; PAMPALONE, V.; TODISCO, F.; VERGNI, L. Effect of plot size on measured soil loss for two Italian experimental sites. **Biosystems Engineering**, v. 108, p.18-27, 2011.

BOIX-FAYOS, C.; MARTÍNEZ-MENA, M.; ARNAU-ROSALÉN, E.; CALVO-CASES, A.; CASTILLO, V.; ALBALADEJO, J. Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation. **Earth Science Reviews**, v. 78, p. 267-285, 2006.

BOIX-FAYOS, C.; MARTÍNEZ-MENA, M.; CALVO-CASES, A.; ARNAU-ROSALÉN, E.; ALBALADEJO, J.; CASTILLO, V. Causes and underlying processes of measurement variability in field erosion plots in Mediterranean conditions. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 32, p. 85-101, 2007.

BOIX-FAYOS, C.; MARTÍNEZ-MENA, M.; CALVO-CASES, A.; CASTILLO, V.; ALBALADEJO, J. Concise review of interrill erosion studies in SE Spain (Alicante and Murcia): erosion rates and progress of the knowledge from the 1980s. **Land Degradation and Development**, v. 16, p. 517-528, 2005.

BORGES, T. K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, SANTOS, T. E. M.; SILVA, D. D.; SILVA JÚNIOR, V.P. Influência de práticas conservacionistas na umidade do solo e no cultivo do milho (*Zea mays* L.) em semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 38, n. 6, p. 1862-1873, 2014.

BORRELLI, P.; DIODATO, N.; PANAGOS, P. Rainfall erosivity in Italy: a national scale spatio-temporal assessment. **International Journal of Digital Earth**, v. 9, n. 9, p. 835-850, 2016.

BORUGADDA, V. B.; GOUD, V.V. Biodiesel production from renewable feedstocks: Status and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 4763-4784, 2012.

CAMMERAAT, L. H. A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 27, p. 1201-1222, 2002.

CHAPLOT, V.; LE BISSONNAIS, Y. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 25, p. 145–153, 2000.

COGO, N. P. Uma contribuição à metodologia de estudo das perdas de erosão em condições de chuva natural. I. Sugestões gerais, medição dos volumes, amostragem e quantificação de solo e água de enxurrada. 1ª aproximação. In: Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do Solo, 2. Passo fundo 1978, **Anais**, Passo Fundo, EMBRAPA, p.75-98, 1978.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declividade e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 743-753, 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

FOSTER, G. R.; MCCOOL, D. K.; RENATO, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conservation of the Universal Soil Loss Equation the SI metric units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 36, p. 355-359, 1981.

LEYS, A.; GOVERS G.; GILLIJNS, K.; BERCKMOES, E.; TAKKEN, I. Scale effects on runoff and erosion losses from arable land under conservation and conventional tillage: The role of residue cover. **Journal of Hydrology**, v. 390, p. 143-154, 2010.

LI, R.; HOU, X.; JIA, Z.; HAN, Q.; REN, X.; YANG, B. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China. **Agricultural Water Management**, v. 116, p. 101-109, 2013.

LIMA, C. A.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M.; ANDRADE, E. M.; MONTEIRO, A. L. N. Práticas agrícolas no cultivo da mandioca e suas relações com o escoamento superficial, perdas de solo e água. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 4, p. 697-706, 2015.

MARTINEZ, G.; WELTZ, M.; PIERSON, F. B.; SPAETH, K. E. PACHEPSKY, Y. Scale effects on runoff and soil erosion in rangelands: Observations and estimations with predictors of different availability. **Catena**, v. 151, p. 161–173, 2017.

MONTENEGRO, A. A. A.; LIMA, J. L. M. P. DE; ABRANTES, J. R. C. B.; SANTOS, T. E. M. Impact of mulching on soil and water conservation in semiarid catchment: simulated rainfall in the Field and in the Laboratory. **Die Bodenkultur** , v. 64, n. 3-4, p. 79-85, 2013a.

MONTENEGRO, A. A. A.; ABRANTES, J. R. C. B.; LIMA, J. L. M. P.; SINGH, V.P.; SANTOS, T. E. M. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. **Catena**, v. 109, p. 139-149, 2013b.

NEARING, M. A.; UNKRICH, C.; NICHOLS, M. H.; GOODRICH, D.; KEEFER, T. Temporal and elevation trends in rainfall erosivity on a 149 km² watershed in a semi-arid region of the American Southwest. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 3, p. 77-85, 2015.

OLIVEIRA, F. A.; OLIVEIRA, M. K. T.; SILVA, R. C. P.; SILVA, O. M. P.; MAIA, P. M. E.; CÂNDIDO, W. S. Crescimento de mudas de moringa em função da salinidade da água e da posição das sementes nos frutos. **Revista Árvore**, v.37, n.1, p.79-87, 2013.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: a review. **Catena**, v. 100, p. 139-147, 2013.

RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. M.; MENDONÇA, L. A. R. ARAÚJO, J. C.; PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO, E. M. Respostas hidrológicas em pequenas bacias na região semiárida em função do uso do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 312-318, 2013.

ROZINA, ASIF, S.; AHMAD, M.; ZAFAR, M.; NSIR, A. Prospects and potential of fatty acid methyl esters of some non-edible seed oils for use as biodiesel in Pakistan. **Renew. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 687-702, 2017.

SADEGHI, S.H.R.; SEGHALEH, M. B.; RANGAVAR, A. S. Plot sizes dependency of runoff and sediment yield estimates from a small watershed. **Catena**, v. 102, p. 55-61, 2013.

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; GUERREIRO, M. J. S.; MEDEIROS, P. H. A.; PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO NETO, J. R. Effect of dry spells and soil cracking on runoff generation in a semiarid micro watershed under land use change. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 1057–1066, 2016.

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; MEDEIROS, P. H. A.; GUERREIRO, M. J. S.; PALÁCIO, H. A. Q. Land use impact on soil erosion at different scales in the Brazilian semi-arid. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 48, n. 2, p. 251-260, 2017a.

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; MEDEIROS, P. H. A.; GUERREIRO M. J. S.; PALÁCIO H. A. Q. Effect of Rainfall Characteristics on Runoff and Water Erosion for Different Land Uses in a Tropical Semiarid Region. **Water Resources Management**, v. 31, p. 173-185, 2017b.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A. Erosividade e padrões hidrológicos de precipitação no Agreste Central pernambucano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 871-880, 2012.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; PEDROSA, E. M. R. Características hidráulicas e perdas de solo e água sob cultivo do feijoeiro no semiárido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 217-225, 2009.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 7, p. 670-679, 2011.

SANTOS, T. E. M.; SILVA, D. D.; MONTENEGRO, A. A. A. Temporal variability of soil water content under different surface conditions in the semiarid region of Pernambuco State. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1733-1741, 2010.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA JR., V. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Erosão hídrica e perda de carbono orgânico em diferentes tipos de cobertura do solo no semiárido, em condições de chuva simulada. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 2, p. 29-34, 2008.

SCHAFFEL, S. B.; LA ROVERE, E. L. The quest for eco-social efficiency in biofuels production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 1663-1670, 2010.

STATSOFT INC., 2011. Statistica™ (data analysis software system), version 9. Available at:<http://www.statsoft.com>.

SHEN, J. Y.; ZHAO, D. D.; HAN, H. F.; ZHOU, X. B.; LI, Q. Q. Effects of straw mulching on water consumption characteristics and yield of different types of summer maize plants. **Plant, Soil and Environment**, v. 58, p. 161-166, 2012.

SILVA, J. R. L. **Investigação da dinâmica dos processos hidrológicos e sedimentológicos em escala de parcela no semiárido de Pernambuco**. 2015. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2015.

SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTEIRO, A. L. N.; SILVA JUNIOR, V.P. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. **Agrária**, v. 10, p. 293-303, 2015.

TRINDADE, A. L. F.; OLIVEIRA, P. T. S.; ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 12, p. 1918-1928, 2016.

XIE, Y.; YIN, S.; LIU, B. Y.; NEARING, M. A.; ZHAO, Y. Models for estimating daily rainfall erosivity in China. **Journal of Hydrology**, v. 535, p. 547-558, 2016.

YAIR A, RAZ-YASSIF N. Hydrological processes in a small arid catchment: scale effects of rainfall and slope length. **Geomorphology**, v. 61, p. 155-169, 2004.

YAIR A, KOSSOVSKY A. Climate and surface properties: hydrological response of small arid and semi-arid watersheds. **Geomorphology**, v. 42, p. 43-57, 2002.

WISCHMEIER, W.H; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978. 58p. (Agricultural Handbook, 537).

CAPÍTULO III – Comparative evaluation of factors influencing seeds displacement over the soil of nonconventional perennial crops: Moringa (*Moringa oleifera* Lam.) and Neem (*Azadirachta indica* A. Juss.)¹

Abstract: Planning the vegetation restoration of badlands requires an understanding of the mechanisms associated with seed transport due to runoff and soil erosion. This is particularly important in semiarid environments, such as those found in Pernambuco, Northeast Brazil, where rainfall mostly occurs in the form of intense short-term events with a high potential to trigger strong runoff and soil erosion processes. The aim of this laboratory study was to evaluate the effect of seed morphology, surface slope, soil surface cover conditions and rainfall characteristics on the transport of moringa (*Moringa oleifera* Lam.) and neem (*Azadirachta indica* A. Juss.) seeds in a soil flume under simulated rainfall. Rainfall intensities (45-270 mm h⁻¹) and patterns (uniform, advanced and delayed) were simulated on a variety of surface slopes (10, 30, 50 and 70%), where 27 seeds of each species were distributed on the soil surface of bare soil or under applied mulching (coconut powder at a density of 8 t ha⁻¹). Seed transport by runoff increased with rainfall intensity and surface slope and decreased with mulching. This study suggests that the application of mulch as an erosion control technique and the use of heavy and flat seeds would help vegetation restoration on steep slopes highly prone to soil erosion.

Keywords: Seeds displacement, seed washout; rainfall simulations; laboratory experiments

Resumo: Planejar a restauração da vegetação em áreas degradadas requer uma compreensão dos mecanismos associados ao transporte de sementes devido ao escoamento superficial e à erosão do solo. Isso é particularmente importante em ambientes semiáridos, como os encontrados em Pernambuco, região Nordeste do Brasil, onde a maioria das chuvas ocorre na forma de eventos intensos de curto prazo com alto potencial para desencadear fortes processos de escoamento e erosão do solo. O objetivo deste trabalho de laboratório foi avaliar o efeito da morfologia de sementes, declividade superficial, condições de cobertura da superfície do

¹ Artigo aceito pelo Journal of Soil Science

solo e características da chuva no transporte de sementes de moringa (*Moringa oleifera* Lam.) e nim (*Azadirachta indica* A. Juss.) em um canal de solo. Precipitação simulada, intensidades de precipitação (45-270 mm h⁻¹) e padrões de chuva (uniforme, avançado e retardado) foram simuladas em uma variedade de declives de superfície (10, 30, 50 e 70%), onde 27 sementes de cada espécie foram distribuídas no solo descoberto e sob cobertura morta (coco em pó a uma densidade de 8 t ha⁻¹). O transporte de sementes por escoamento aumentou com a intensidade da chuva e a inclinação da superfície e diminuiu com a cobertura morta. Este estudo sugere que a aplicação da cobertura morta como técnica de controle da erosão e o uso de sementes pesadas e planas ajudariam a restauração da vegetação em encostas íngremes altamente propensas à erosão do solo.

Keywords: deslocamento de sementes, perdas de sementes; simulador de chuva; experimento laboratorial.

1. INTRODUCTION

Vegetation restoration of badlands is an effective approach, but it is influenced by runoff and soil erosion that not only reduce the availability of water and nutrients in the soil but also transport and remove seeds that could naturally generate new plants (WANG et al., 2014; BOCHET, 2015). On the other hand, natural vegetation restoration in bare badlands is strongly dependent on seed transport and removal from nearby vegetation patches. Also, redistribution could be an opportunity for seeds to reach more favourable sites for germination and survival (WANG et al., 2013; BOCHET, 2015).

Therefore, designing plans aimed at rehabilitating degraded soils based on vegetation restoration requires an understanding of the mechanisms associated with seed transport due to runoff and soil erosion. This is even more important in arid and semiarid environments such as those found in the Pernambuco regions of Agreste and Sertão, in northeastern Brazil, because rainfall mostly occurs as intense short-term events with high potential to trigger strong runoff and soil erosion processes.

Moringa (*Moringa oleifera* Lam.) and neem (*Azadirachta indica* A. Juss.) are two exotic seed species that have been cultivated in the aforementioned region. Both species are adapted to the local climate conditions and soil characteristics. Moringa is a species of the *Moringaceae* family, native to the southern Himalayas (India and Pakistan) and neem is from the *Meliceae* family, native to Pakistan, Bangladesh, Burma, India, Sri Lanka, Malaysia and Cuba. The oil extracted from the seeds has been used for water treatment and medical purposes and in the production of biodiesel (ROZINA et al., 2017; KAFUKU; MBARAWA, 2010). As perennial crops, their role to prevent soil erosion in degraded areas is relevant because the presence of leaves would reduce raindrop kinetic energy, and would therefore indirectly lower runoff.

Several studies have been conducted on the influence of different factors on seed transport by runoff, such as seed morphology (CERDÀ; GARCÍA-FAYOS, 1997; GARCÍA-FAYOS; CERDÀ, 1997; CERDÀ; GARCÍA-FAYOS, 2002; de LIMA et al., 2006; GARCÍA-FAYOS; BOCHET; CERDÀ, 2010; HAN et al., 2011; WANG et al., 2013), rainfall intensity (HAN et al., 2011; YU et al., 2016), surface slope (CERDÀ; GARCÍA-FAYOS, 1997; GARCÍA-FAYOS; CERDÀ, 1997; de LIMA et al., 2006; EMMERSON et al., 2010; HAN et al., 2011) and vegetation cover (AERTS et al., 2006; ISSELIN-NONDEDEU et al., 2006; YU et al., 2016). These studies were conducted in the laboratory using simulated rainfall and soil flumes (de LIMA et al., 2006; HAN et al., 2011; WANG et al., 2013), in the field using either natural (AERTS et al., 2006; ISSELIN-NONDEDEU et al., 2006; EMMERSON et al., 2010; YU et al., 2016) or simulated rainfall (CERDÀ AND GARCÍA-FAYOS, 1997; GARCÍA-FAYOS AND CERDÀ, 1997; CERDÀ; GARCÍA-FAYOS, 2002; AERTS et al., 2006; GARCÍA-FAYOS; BOCHET; CERDÀ, 2010) and even numerical modelling (THOMPSON et al., 2014).

The results of these studies pointed to a general increase of seed transport under higher rainfall intensity, higher surface slope and lower vegetation cover. Nevertheless, the aforementioned studies were conducted using limited ranges of rainfall intensities and surface slopes and no attention was paid to rainfall patterns. Moreover, few studies focused on the effects of mulching on seed transport by runoff, although mulching has been used for a long time to reduce soil loss, prevent land degradation and improve the fertility and productivity of

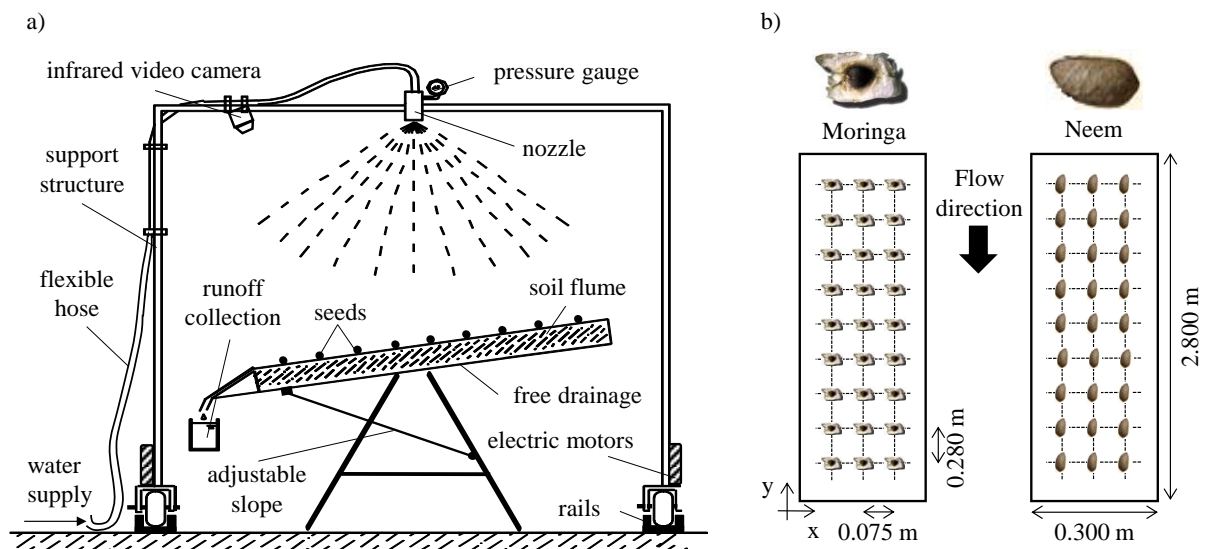
agricultural soils (MONTENEGRO et al., 2013) and as a post-fire erosion control treatment (FERNÁNDEZ et al., 2012).

Therefore, this study aimed to evaluate the effect of seed morphology, rainfall intensity, rainfall patterns and surface slope on the transport of moringa and neem seeds in controlled laboratory experiments involving a soil flume under simulated rainfall, under both bare soil and soil under mulching. Literature comparing the performance of these species to native plants already colonizing the area is currently lacking and was beyond the scope of this study.

2. MATERIALS AND METHODS

Experiments were conducted in the laboratory setup shown in Figure 1, which comprised a rainfall simulator and a free drainage rectangular soil flume (de LIMA et al., 2003; MONTENEGRO et al., 2013). The displacement of moringa and neem seeds by surface runoff was evaluated for different surface slopes (10, 30, 50 and 70%), rainfall intensities (45, 90, 135, 180 and 270 mm h⁻¹), rainfall patterns (uniform, advanced and delayed) and soil surface cover conditions (bare soil and mulching with coconut powder at a density of 8 t ha⁻¹).

Figure 1. Sketch of the laboratory setup used in the experiments (not to scale): a) Rainfall simulator, soil flume and infrared video camera; b) Position of the seeds in the soil flume before a rainfall simulation.



2.1. Rainfall simulator

The rainfall simulator (Figure 1a) has a pressurized hydraulic system consisting of a full-cone nozzle with a continuous spray design, positioned 2.2 m above the geometric centre of the soil flume surface. A submerged pump installed in a constant head reservoir supplied water to the nozzle at a steady operating pressure of 1.4 bar. The nozzle was fixed to an electrically powered structure that moves it in one direction along a pair of rails.

Two full-cone nozzles (Fulljet nozzles from Spraying Systems Co.) were used to obtain the rainfall intensities covered in this study: i) a 3/8-HH-22 nozzle, with an orifice diameter of 4.8 mm and a spray angle of 90°, producing a total discharge of 11.4 L min⁻¹; and ii) a 3/4-HH-2.5 nozzle, with a 4.8 mm orifice diameter and a spray angle of 50°, producing a total discharge of 15.5 L min⁻¹.

2.2. Soil flume and soil characteristics

The soil flume (Figure 1b) consisted of metal sheets, 2.8 m long, 0.3 m wide and 0.1 m deep, with a permeable base that allowed free drainage. The flume was supported by a metal structure with an adjustable longitudinal slope.

A loamy-sand soil collected from the banks of River Mondego in Coimbra, Portugal was used in the experiments. The soil contained 6% clay, 11% silt, and 82% sand, and had a saturated hydraulic conductivity of approximately 4.5×10⁻⁶ m s⁻¹ at the target bulk density of about 1500 kg m⁻³.

2.3. Seed characteristics

Seeds of the moringa (*Moringa oleifera* Lam.) and neem (*Azadirachta indica* A. Juss.) species used in the experiments were collected in the semiarid region of Pernambuco in the northeast of Brazil. Seed morphology was characterised using the following parameters (CERDÀ; GARCÍA-FAYOS, 2002):

$$A = L \times W \tag{1}$$

$$V = A \times H \tag{2}$$

$$D = \frac{M}{V} \quad (3)$$

$$FI = \frac{L+W}{2H} \quad (4)$$

$$EI = \frac{L}{W} \quad (5)$$

where A is the surface area, V is the volume, D is the density, FI is the flatness index, EI is the eccentricity index, L is the length, W is the width, H is the height and M is the mass of the seeds.

Length, width, height and mass were measured using a digital calliper and a precision weighing scale, for 22 representative seeds of each species (Table 1). Moringa seeds had a spherical shape, a flatness index of 1.09 and eccentricity index of 1.18, whereas the neem seeds had an elongated oval shape, a flatness index of 1.63 and an eccentricity index of 2.71. Moringa seeds also had wing-like appendages and the ability to segregate mucilage on contact with water.

Table 1. Average moringa and neem seeds' morphological characteristics.

| Seed morphology | Seed type | |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Moringa | Neem |
| Mass (g) | 0.29 ± 0.06 | 0.51 ± 0.04 |
| Length (mm) | 13.0 ± 1.0 | 19.0 ± 0.9 |
| Width (mm) | 11.0 ± 0.8 | 7.0 ± 0.8 |
| Height (m) | 11.0 ± 1.0 | 8.0 ± 0.9 |
| Surface area (mm ²) | 143 | 133 |
| Volume (mm ³) | 1573 | 1064 |
| Density (g mm ³) | 1.84 × 10 ⁻⁴ | 4.79 × 10 ⁻⁴ |
| Flatness Index (-) | 1.09 | 1.18 |
| Eccentricity Index (-) | 1.63 | 2.71 |
| Shape | Spherical round | Spherical long |
| Appendage | Wings | None |
| Mucilage segregation | Yes | No |

2.4. Experimental procedure

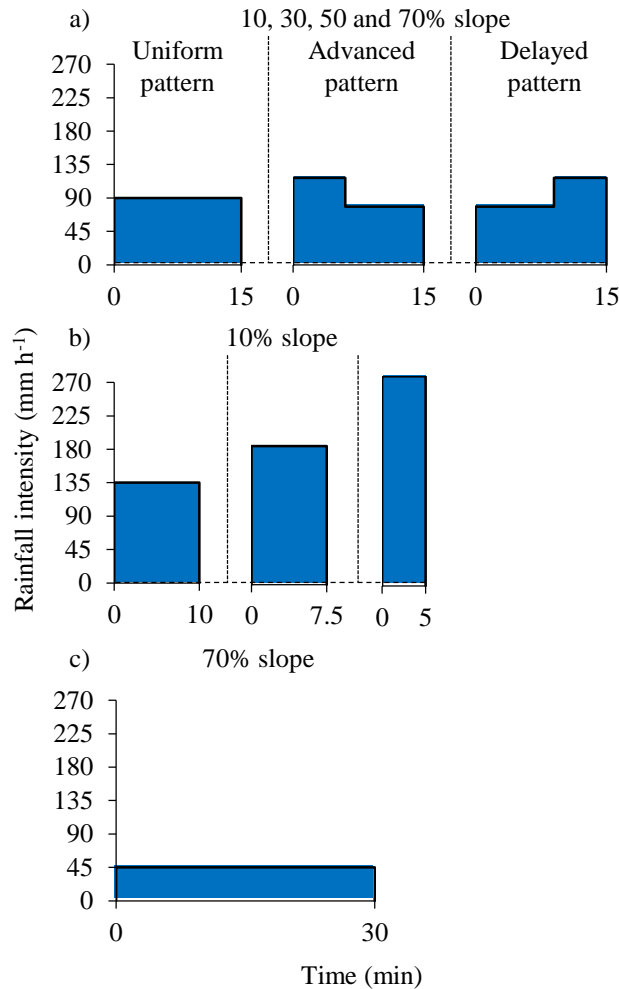
At the beginning of the experiments, sieved air dried soil was manually spread over the flume and compacted to obtain a soil layer with a uniform thickness of 0.05 m, a bulk

density of $\sim 1500 \text{ kg m}^{-3}$ and a smooth topsoil surface. Since the objective of this study was to investigate the displacement of seeds by surface runoff, the soil was saturated by surface inundation to accelerate runoff initiation. After each rainfall simulation, the soil lost by erosion was replaced with fresh soil that was compacted and saturated to ensure identical initial conditions for the next simulation.

For each rainfall simulation, 27 seeds of one of the species were arranged on the soil surface of the flume in a regular ($0.280 \times 0.075 \text{ m}^2$) grid (Figure 1b). Preliminary tests showed that positioning the neem seeds with their longest axis perpendicular or parallel to the direction of runoff did not influence their displacement. The seeds were marked with a number to track their position on the flume at the beginning and at the end of rainfall simulation in order to measure their displacement.

For each seed species, a total of 20 rainfall events were conducted under different experimental conditions: i) experiment I: 4 rainfall events with uniform pattern (Figure 2a) and average intensity of 90 mm h^{-1} lasting 15.0 min, for 10, 30, 50 and 70% surface slopes and bare soil and mulching with coconut powder at a density of 8 t ha^{-1} ; ii) experiment II: 12 rainfall events combining uniform, advanced and delayed patterns, with average intensity of 90 mm h^{-1} lasting 15 min, for 10, 30, 50 and 70% surface slopes and bare soil (the advanced and delayed patterns were symmetrical and combined rainfall intensities of 112 and 75 mm h^{-1} lasting 6 and 9 min, respectively, Figure 2a); iii) experiment III: 3 rainfall events with uniform pattern and average intensities of 135, 180 and 270 mm h^{-1} and durations of 10.0, 7.5 and 5.0 min, respectively, for 10% slope and bare soil (Figure 2b); and iv) experiment IV: 1 rainfall event with uniform pattern and average intensity of 45 mm h^{-1} for 30.0 min, for 70% slope and bare soil (Figure 2c).

Figure 2. Scheme of the rainfall events simulated in the experiments: a) Uniform, advanced and delayed patterns, with average intensity of 90 mm h⁻¹ and 15 min duration, simulated on 10, 30, 50 and 70% slopes; b) Uniform rainfall events with intensities of 135, 180 and 270 mm h⁻¹ and durations of 10.0, 7.5 and 5.0 min, respectively, simulated on 10% slope; c) Uniform rainfall events with intensity of 45 mm h⁻¹ and 30.0 min duration, simulated on 70% slope. The non-uniform events were symmetrical, and combined higher and lower rainfall intensities of 112 and 75 mm h⁻¹ lasting 6 and 9 min, respectively.



All events delivered about the same total rainfall amount, which corresponded to a 10-year return period for the Pesqueira Region in semiarid Pernambuco in northeastern Brazil (SANTOS; MONTENEGRO, 2012). Rainfall intensities of 45, 75, 90 and 112 mm h⁻¹ were simulated using the 3/8-HH-22 nozzle and intensities of 135, 180 and 270 mm h⁻¹ were simulated using the 3/4-HH-2.5 nozzle. Different intensities using the same nozzle were achieved by regulating the velocity of the structure supporting the nozzle. The uniformity coefficient of Christiansen varied between 50-75% for all rainfall intensities and surface

slopes. All experimental conditions were repeated 3 times for each seed species to ensure reliability of the simulations.

2.5. Measurements during simulations

Runoff hydrographs were monitored at the downstream end of the flume by periodically sampling runoff volumes at regular intervals of 10 s. Collected samples of runoff were dried in an oven at 105 °C to determine sediment and seed washout.

A thermal tracer technique using hot water was used to measure the overland flow velocity over the soil surface of the flume just before the end of a rainfall event, following the procedure described in de Lima and Abrantes (2014) and de Lima et al. (2015). Hot water was injected at 27 locations of the soil surface of the flume, in the same regular grid as the initial position of the seeds (Figure 1b), and the movement of the hot water was recorded using an Optris PI-160 infrared video camera (from Optris GmbH) attached to the support structure of the rainfall simulator (Figure 1a). A volume of between 5-15 ml of hot water was injected at each point, depending on the runoff rate.

2.6. Data analysis

Statistical analysis was performed considering 4 independent sets of experiments: i) Experimental set I with 2 seed types (moringa and neem) \times 4 surface slopes (10, 30, 50 and 70%) \times 2 cover conditions (bare soil and mulched); ii) Experimental set II with 2 seed types (moringa and neem) \times 4 surface slopes (10, 30, 50 and 70%) \times 3 rainfall patterns (uniform, advanced and delayed); iii) Experimental set III with 2 seed types (moringa and neem) \times 4 uniform rainfall intensities (90, 135, 180 and 270 mm h⁻¹) \times 1 surface slope (10%); and iv) Experimental set IV with 2 seed types (moringa and neem) \times 2 uniform rainfall intensities (45 and 90 mm h⁻¹) \times 1 surface slope (70%). Data analysis was performed for 3 repetitions of each experiment, each repetition containing a total of 27 seeds.

Analysis of variance (ANOVA) was employed after the seed displacement data were transformed to $\sqrt{x} + 0.5$ in order to reduce experimental variance (for more details, see MICHEREFF, 2009). Because some seeds washed out of the channel on the steeper slopes the

data were grouped into 3 indices for the analyses that included slopes of 50% and 70%: 0 (without seed displacement), 1 (seed displaced within the channel) and 2 (seeds washed out of the channel). Significant differences between experiments were evaluated by Tukey's test at 5% confidence intervals. Relations between seed displacement and runoff, soil loss, rainfall intensity and runoff velocity were evaluated by linear regression analysis at 5% confidence level using Statistica 9 (STATSOFT Inc., 2011).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Seed washout and seed displacement

For all 20 experimental conditions, seeds that moved within the soil flume but were not washed out of the flume by runoff (i.e., seed displacement) were evaluated by the total distance travelled and the percentage of seeds, while only percentage of seeds was used to evaluate seeds washed off the flume by runoff (i.e., seed washout) (Table 2). Figures 3 and 4 show the displacement of the moringa and neem seeds within the flume. The number of seeds washed off the flume by runoff is shown in Figure 5.

Table 2. Seed displacement (in terms of total distance travelled by the seeds and percentage of seeds) and seed washout (in terms of percentage of seeds) of moringa and neem seeds, for all experimental conditions. Values are averages of 3 repetitions.

| Rainfall event | | Slope (%) | Soil surface condition | Seed specie | | | | | | |
|---------------------------------|---------|-----------|------------------------|------------------------------------|---------------|-------------------------------|-----------------------|---------------|------------------|----|
| Intensity (mm h ⁻¹) | Pattern | | | Moringa | | Seed washout ^b (%) | Neem | | Seed washout (%) | |
| | | | | Seed displacement ^a (m) | (%) | | Seed displacement (m) | (%) | | |
| 45 | Uniform | 70 | Bare soil | 0.1820 ± 0.26 | 33 | 30 | 0.1760 ± 0.21 | 63 | 15 | |
| | | | Bare soil | 0.0050 ± 0.02 | 30 | 0 | 0.0020 ± 0.02 | 15 | 0 | |
| | | 10 | Mulching | 0.0005 ± 0.01 | 7 | 0 | 0.0002 ± 0.01 | 4 | 0 | |
| | | | Bare soil | 0.0250 ± 0.06 | 46 | 0 | 0.0200 ± 0.05 | 44 | 0 | |
| | | 30 | Mulching | 0.0220 ± 0.03 | 44 | 0 | 0.0170 ± 0.02 | 44 | 0 | |
| | | | Bare soil | 0.1060 ± 0.15 | 56 | 26 | 0.0390 ± 0.07 | 59 | 15 | |
| | 90 | Uniform | 50 | Mulching | 0.0840 ± 0.16 | 59 | 19 | 0.0220 ± 0.04 | 35 | 11 |
| | | | | Bare soil | 0.5810 ± 0.70 | 7 | 85 | 0.3720 ± 0.56 | 4 | 81 |
| | | Advanced | 70 | Mulching | 0.1470 ± 0.24 | 19 | 56 | 0.0250 ± 0.08 | 15 | 33 |
| | | | | Bare soil | 0.0080 ± 0.01 | 41 | 0 | 0.0030 ± 0.01 | 26 | 0 |
| | | | 30 | Bare soil | 0.030 ± 0.06 | 48 | 0 | 0.0190 ± 0.05 | 41 | 0 |
| | | | | Bare soil | 0.1500 ± 0.24 | 59 | 22 | 0.0610 ± 0.08 | 56 | 19 |
| Delayed | 50 | Bare soil | 0.5400 ± 0.77 | 19 | 70 | 0.2970 ± 0.36 | 26 | 59 | | |
| | | Bare soil | 0.0060 ± 0.01 | 26 | 0 | 0.0050 ± 0.01 | 26 | 0 | | |
| | 70 | Bare soil | 0.0280 ± 0.07 | 48 | 0 | 0.0150 ± 0.04 | 44 | 0 | | |
| | | Bare soil | 0.1010 ± 0.16 | 48 | 19 | 0.0410 ± 0.07 | 26 | 15 | | |
| 135 | Uniform | 10 | Bare soil | 0.2420 ± 0.35 | 26 | 48 | 0.2120 ± 0.29 | 30 | 37 | |
| 180 | Uniform | 10 | Bare soil | 0.0150 ± 0.02 | 52 | 0 | 0.0130 ± 0.02 | 52 | 0 | |
| 270 | Uniform | 10 | Bare soil | 0.0330 ± 0.05 | 52 | 0 | 0.0220 ± 0.04 | 52 | 0 | |
| | Uniform | 10 | Bare soil | 0.0630 ± 0.09 | 63 | 0 | 0.0520 ± 0.08 | 56 | 0 | |

^aSeeds that moved within the soil flume surface and were not washed out from the flume by runoff.

^bSeeds washed out from the flume by runoff.

Figure 3. Seed displacement in perpendicular and parallel directions to runoff (x-y graphs) and seed washout (circles with arrow) for uniform advanced and delayed rainfall patterns at average intensity of 90 mm h^{-1} for the slopes of: a) 10%; b) 30%; c) 50%; d) 70%. Uniform patterns show both bare soil and soil under mulch. Values are averages of 3 repetitions.

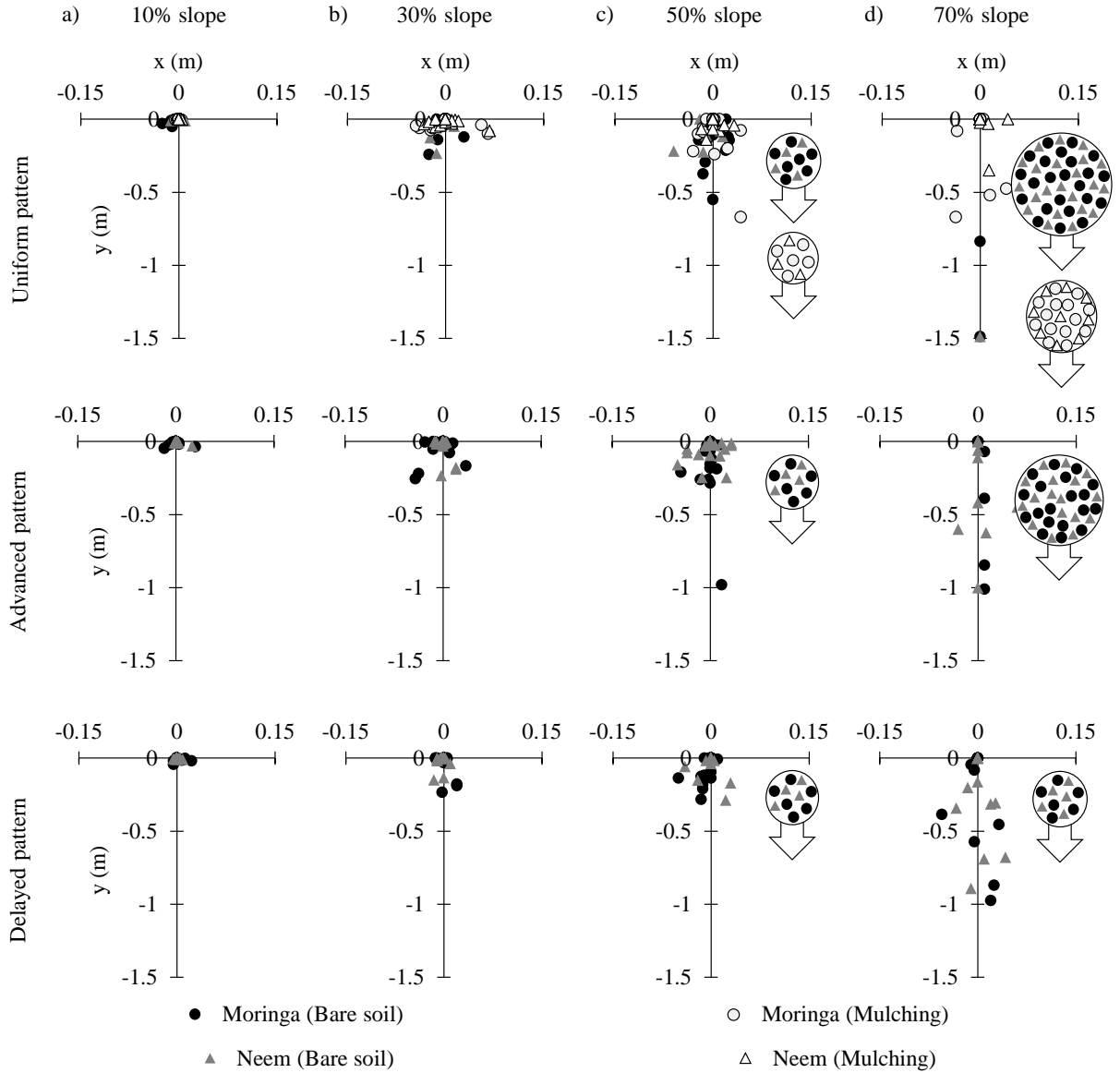


Figure 4. Seed displacement in perpendicular and parallel directions to runoff (x-y graphs) and seed washout (circles with arrow): a) Rainfall intensities of 90, 135, 180 and 270 mm h⁻¹ for 10% slope; and b) Rainfall intensities of 45 and 90 mm h⁻¹ for 70% slope. Only uniform patterns and bare soil conditions are shown. Values are averages of 3 repetitions.

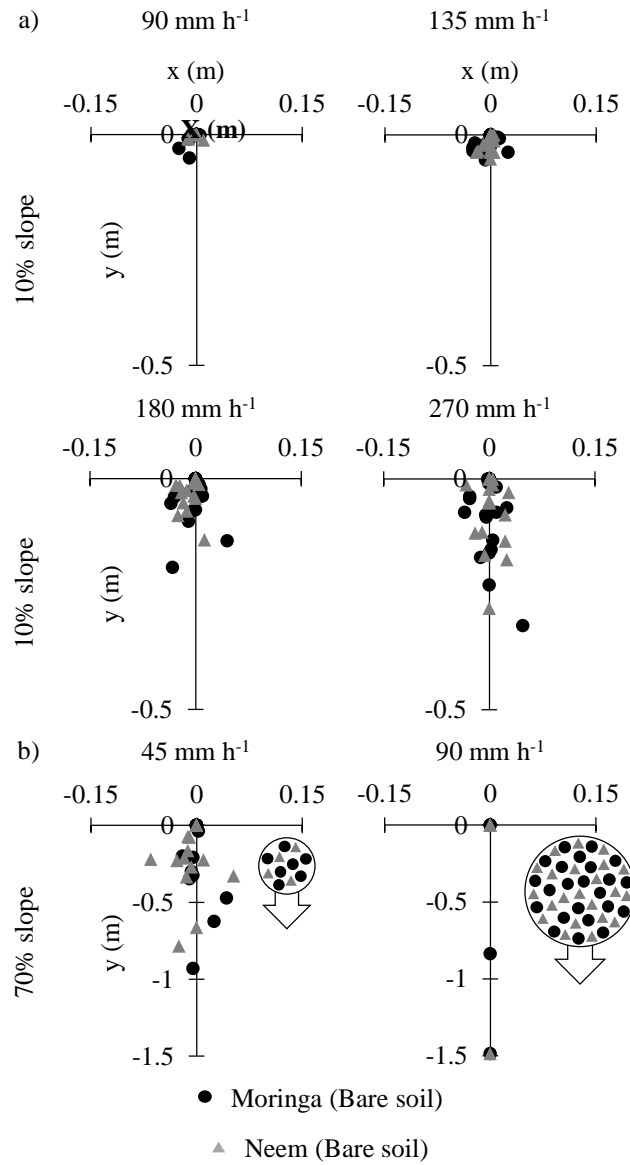
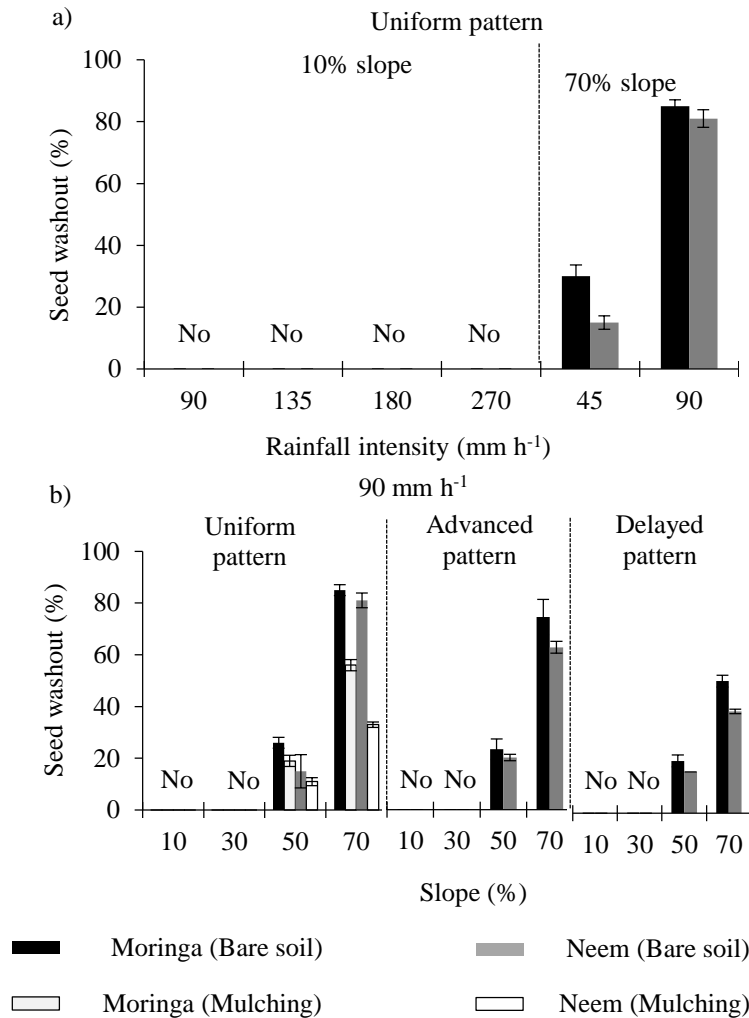


Figure 5. Seed washout (averages and standard deviations of 3 repetitions) and: a) Rainfall intensity, for 10 and 70% slopes; b) Slope, for uniform, advanced and delayed rainfall patterns at average intensity of 90 mm h⁻¹ (uniform patterns show both bare soil and soil under mulch).



Statistical analysis of the mean seed displacement for the uniform rainfall intensities of 90, 135, 180 and 270 mm h⁻¹ for 10% surface slope under bare soil conditions is presented in Table 3. Since the steeper slopes (50% and 70%) have large amounts of seeds displaced from the channel, average values of displacement were grouped into three indices for each experiment (Tables 4 to 6).

Table 3. Mean displacement and standard deviation of moringa and neem seeds for the uniform rainfall intensities of 90, 135, 180 and 270 mm h⁻¹ for 10% surface slope in bare soil conditions.

| Rainfall intensity (mm h ⁻¹) | Seed displacement (m) | S.d. |
|--|-----------------------|------|
| 270 | 0.0575 a | 0.08 |
| 180 | 0.0275 b | 0.05 |
| 135 | 0.0140 bc | 0.02 |
| 90 | 0.0035 c | 0.01 |

Mean values and S.d. Standard deviation and followed by the same lowercase letter in column do not differ significantly in Tukey's test (p< 0.05).

Table 4. Mean displacement index and respective standard deviation of Moringa and Neem seeds for 10, 30, 50 and 70% slopes in bare soil and soil under mulch for a rainfall intensity of 90 mm h⁻¹ in a uniform pattern (dimensionless).

| Slope (%) | Moringa | | | | Neem | | | |
|-----------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|
| | Soil surface condition | | | | Soil surface condition | | | |
| | Bare soil | | Mulching | | Bare soil | | Mulching | |
| | Mean displacement index | S.d. | Mean displacement index | S.d. | Mean displacement index | S.d. | Mean displacement index | S.d. |
| 70 | 1.73 aA | 0.65 | 1.31 aB* | 0.86 | 1.70 aA | 0.66 | 0.81 aB* | 0.91 |
| 50 | 1.07 bA | 0.74 | 0.77 bA | 0.68 | 0.79 bA | 0.79 | 0.58 abA | 0.74 |
| 30 | 0.47 cA | 0.50 | 0.35 cA | 0.48 | 0.44 cA | 0.50 | 0.28 bcA | 0.45 |
| 10 | 0.23 cA | 0.43 | 0.07 cA | 0.26 | 0.12 cA | 0.33 | 0.02 cA | 0.16 |

Values represent: Index 0, without seed displacement; Index 1, seed displaced within the channel; and Index 2, seeds washed out of the channel. Mean values followed by the same lowercase letter in column and uppercase letter in row do not differ significantly for Tukey's test (p<0.05), upper case letter in row within the same seed specie do not difference,*means significant difference between seed specie within mulching at 70%.S.d. - Standard deviation.

Table 5. Mean displacement Index and respective standard deviation of moringa and neem seeds for the uniform rainfall intensities of 45 and 90 mm h⁻¹ for 70% surface slope in bare soil conditions (dimensionless).

| Rainfall intensity (mm h ⁻¹) | Mean values of seed displacement index | S.d. |
|--|--|------|
| 90 | 1.72 a | 0.65 |
| 45 | 0.86 b | 0.75 |

Values represent: Index 0, without seed displacement; Index 1, seed displaced within the channel; and Index 2, seeds washed out of the channel. Mean values followed by the same lowercase letter in column do not differ significantly for Tukey's test (p<0.05). S.d. - Standard deviation.

Table 6. Mean displacement Index and respective standard deviation of moringa and neem seeds for 10, 30, 50 and 70% slopes in bare soil conditions for a rainfall intensity of 90 mm h⁻¹ in a uniform, advanced and uniform pattern (dimensionless).

| Slope (%) | Rainfall pattern | | | | | |
|-----------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|
| | Uniform | | Advanced | | Delayed | |
| | Mean displacement index | S.d. | Mean displacement index | S.d. | Mean displacement index | S.d. |
| 70 | 1.72 a A | 0.65 | 1.56 a A | 0.71 | 1.12 a B | 0.85 |
| 50 | 0.93 b AB | 0.77 | 0.98 b A | 0.66 | 0.74 b B | 0.73 |
| 30 | 0.31 c A | 0.47 | 0.38 c A | 0.49 | 0.37 c A | 0.48 |
| 10 | 0.18 c A | 0.38 | 0.31 c A | 0.46 | 0.23 c A | 0.43 |

Values represent: Index 0, without seed displacement; Index 1, seed displaced within the channel; and Index 2, seeds washed out of the channel. Mean values followed by the same lowercase letter in column and uppercase letter in row do not differ significantly for Tukey's test ($p < 0.05$). S.d. - Standard deviation.

3.2. Effect of seed morphology

In general, for all simulated experimental conditions, the lighter and rounder moringa seeds, whose characteristics favour rolling down the slope, were more easily transported than the heavier and flatter neem seeds. However, this difference was only statistically significant for the 70% surface slope with mulching (Table 4). Several studies have shown that seed morphology (size and shape) plays an important role in seed transport by runoff (CERDÀ; GARCÍA-FAYOS, 2002; de LIMA et al., 2006; GARCÍA-FAYOS et al., 2010; HAN et al., 2011; WANG et al., 2013). Typically, lighter and more spherical seeds, similar to moringa seeds, experience significantly more displacement and washout than heavier and flatter seeds like the ones from neem. However, in our study, the presence of wing-like appendages and the characteristic of the seeds to segregate mucilage (a sticky substance that glues seeds to the ground) when in contact with water, resulted in insignificant runoff displacement of the moringa seeds. Previous studies have shown that these two specific features have a significant impact on the susceptibility of a seed to be transported by runoff, and can mask the relationships between seed transport and seed size, rainfall characteristics, surface slope, vegetation cover, and others (CERDÀ; GARCÍA-FAYOS, 1997; GARCÍA-FAYOS; CERDÀ, 1997; GARCÍA-FAYOS; BOCHET; CERDÀ, 2010; HAN et al., 2011; WANG et al., 2013).

3.3. Effect of surface slope

Our results showed that surface slope was a dominant factor in runoff and soil washout production, as well as in seed transport. The 10 and 30% slopes did not result in any seed washout (Figure 5b), even under the extremely high intensity rainfall event of 270 mm h^{-1} . Seed washout under bare soil conditions and 50% slope, represented on average 26 and 15% of the total moringa and neem seeds, respectively. These figures increased to 85% for the 70% slope. Under mulching, seed washout of moringa was 19 and 56%, and for neem it was 11 and 33% for the 50 and 70% slopes, respectively. In fact, during our experiments, the 50 and 70% slopes induced extreme rill formation, with 0.05 m deep rills (depth of the soil layer) that were not observed in the other slopes. Therefore, this aspect could be directly related to the high seed washout that occurred on these slopes. No seed washout was reported by de Lima et al. (2006) at 10, 20 and 30% slopes either, even for the high intensity simulated rainfall of 185 mm h^{-1} .

Both soil surface condition and slope interfere on the mean displacement index (Table 4). Results suggest that when the surface slope is very high (70%) in the presence of mulching, there is a reduction of seed washing (Figure 5b) and seed displacement (Table 2 and Figure 3). Additionally, at the 70% slope angle, the only differences in seed removal between the two species were under the mulch condition. The lighter and rounder shape of moringa seeds favor downward movement. Hence, moringa seeds were more easily transported than the heavier and flatter neem seeds.

Previous studies have shown that relationships between seed loss, runoff and soil loss were analyzed using regression analyses could be complex because of the seed characteristics. In the studies by Cerdà and García-Fayos (1997) and García-Fayos and Cerdà (1997), a 3.5% slope had lower erosion rates, but higher seed washout than slopes in the range between 40 and 142%, despite a positive correlation observed among slopes in that range and seed washout rate. Han et al. (2011) did not find a significant relationship between seeds displaced by runoff and slope (10-25%). However, soil washout clearly increased due to increasing erosion forces influenced by increasing runoff velocity. Aerts (2006) also found a negative correlation between seed washout and slope, but the studied slope surfaces only varied between 18 and 23%. In de Lima et al. (2006), seed displacement showed a clear positive

relationship with slopes of 10, 20 and 30%. Emmerson et al. (2010) also observed that seed transport and dispersion increased with slope.

3.4. Effect of rainfall characteristics

A positive relationship between the seed transport by runoff and rainfall intensity was observed. For the 70% slope, rainfall events of 45 and 90 mm h⁻¹ intensity resulted in seed washout of 30% and 85% for moringa seeds and 15 and 81% for neem seeds, respectively (Table 2). In Cerdà and García-Fayos (1997), only 4% of the seeds washed out during a 40 min rainfall at 55 mm h⁻¹ on 40-142% slopes.

For the 10% slope, no seeds were washed out of the flume by the effect of runoff even for the extremely high intensity rainfall event of 270 mm h⁻¹ (Figure 5a). These findings are in accordance with Han et al. (2011) and Yu et al. (2016). In Han et al. (2011), with rainfall intensity between 50 and 150 mm h⁻¹ and slopes between 10 and 25%, seeds weighing over 0.190 g (like those in our study) remained on the plots. Similarly, in Wang et al. (2013), for a slope of 35% under rainfall intensity of 120 mm h⁻¹ and a duration of 30 min, seeds weighing over 0.153 g were not removed. However, in Aerts et al. (2006), under a simulated rainfall with a maximum intensity of 120 mm h⁻¹ lasting 10 min on an 18% slope, 32.5% of spherical shaped seeds with a mass of 0.225 g (similar to moringa seeds) were removed.

For both 10% (Table 3) and 70% (Table 5) slopes under bare soil conditions, increasing rainfall intensity resulted in a significant increase in seed displacement. The seed displacement under the rainfall of 90 mm h⁻¹ was statistically significant in relation to rainfall of 270 mm h⁻¹ (Table 3). The high intensity 270 mm h⁻¹ event displaced 63 and 56% of the moringa and neem seeds, respectively, by surface runoff. Therefore, seed displacement is significantly associated with rainfall intensity, a variable that will affect soil erosion and seed dispersion. The lower intensity long duration rainfall event of 45 mm h⁻¹ produced the highest seed dispersion (Figures 3, 4), while the intensity event of 90 mm h⁻¹ resulted in more seed removal (Figure 5a).

In general, for the average rainfall intensity of 90 mm h⁻¹ the delayed pattern produced the lowest seed displacement and seed washout, followed by the advanced and the delayed rainfall patterns. The interaction between soil slope and rainfall patterns for seed displacement

indices was significant (Table 6). However, seed displacement differences between the advanced rainfall pattern and the delayed rainfall pattern were only significant for the 50 and 70% slopes (Table 6); uniform and advanced patterns produced similar results, but values were lower for the delayed patterns. For the advanced and uniform patterns, the early high intensity rainfall rapidly resulted in seed transport, either by runoff or by the splash effect. For the delayed pattern, at the time of the higher intensity part, soil and seeds are already wet and seeds are less prone to displacement due to mucilage segregation or increased seed weight due to water absorption or greater soil surface roughness created by the previous erosion (CERDÀ; GARCÍA-FAYOS, 1997; GARCÍA-FAYOS; CERDÀ, 1997).

3.5. Soil surface cover condition

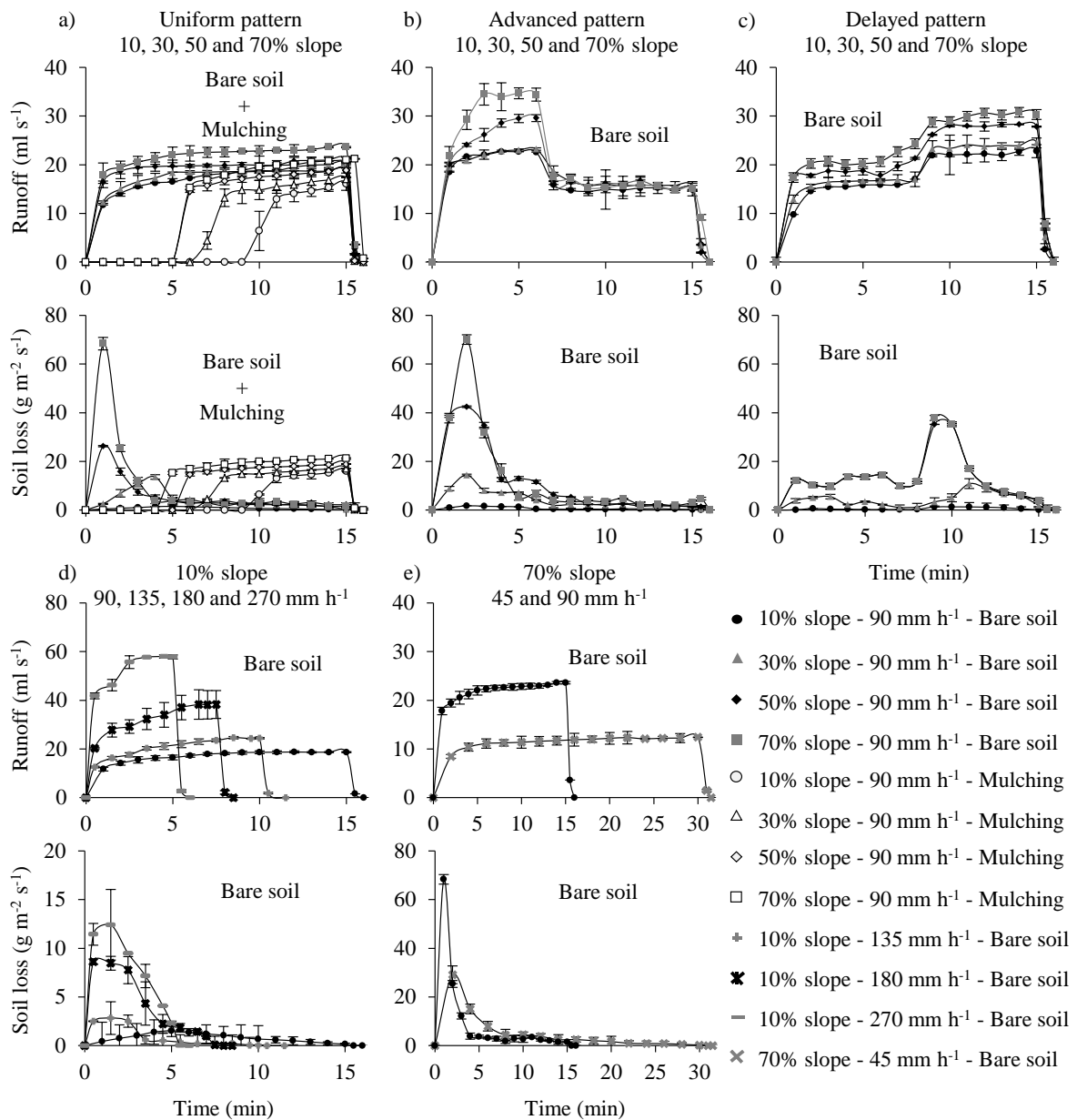
Mulching reduced seed washout and seed displacement (Figure 5b); however, this effect was only significant for the 70% slope (Table 4). For moringa seeds, mulching the 50 and 70% slopes reduced seed washout 27 and 34%, and reduced seed displacement 21 and 75%. For neem seeds, the corresponding values were 27 and 59% for seed washout, and 44 and 93% for seed displacement. Isselin-Nondedeu et al. (2006) also reported a clear reduction in seed transport as a consequence of increasing vegetation cover. Aerts et al. (2006) noted that even high rainfall (120 mm h^{-1}) simulated over shrubs failed to transport more than 33% of the seeds placed under the shrub crowns. Yu et al. (2016) did not see a significant relationship between seed removal and vegetation coverage, but they infer that this could be due to interference from other vegetation characteristics (e.g. spatial distribution patterns of vegetation and plant shoot architecture).

3.6. Runoff and soil loss

Figure 6 shows the runoff and soil loss measured during the rainfall simulations, for all experimental conditions studied (i.e. rainfall intensity, rainfall patterns, slope and soil surface conditions). For both the 10 and 70% slopes, increasing rainfall intensity resulted in higher runoff and soil loss peaks. Overall, advanced and delayed patterns produced higher runoff and soil loss. These results are in agreement with those noted in Montenegro et al.

(2013). For the same rainfall event, increasing the slope from 10 to 70% increased the runoff peak by approximately 30% and the soil loss peak by more than 2000% for both the bare soil and under mulched conditions.

Figure 6. Runoff and soil loss over time for: a) 90 mm h⁻¹ rainfall intensity in a uniform pattern, for 10, 30, 50 and 70% surface slope and both bare soil and soil under mulch; b) 90 mm h⁻¹ average rainfall intensity in an advanced pattern and c) delayed pattern, for 10, 30, 50 and 70% surface slope; d) 90, 135, 180 and 270 mm h⁻¹ rainfall intensities for 10% surface slope; e) 45 and 90 mm h⁻¹ rainfall intensities for 70% surface slope. Average values and standard deviation of 3 repetitions.



Mulching with coconut powder at 8 t ha⁻¹ greatly reduced soil loss and runoff (as also observed for mulching with rice straw in Montenegro et al., 2013). For bare soil, time to

runoff was approximately 1 min for all studied rainfall events and slopes, increasing to 6 to 10 min under mulching, for 70 to 10% slopes, respectively. For the rainfall intensity of 90 mm h^{-1} in a uniform pattern, mulching with coconut powder reduced total runoff volume by 70, 52, 42 and 35% and the total soil loss mass by 82, 77, 63 and 41%, for 10, 30, 50 and 70% slopes, respectively. On average, mulching reduced runoff velocity by 30%.

The relation between seed displacement, runoff and soil loss, both in peak and in total terms, is shown in Figure 7. For uniform, advanced, and delayed patterns with 90 mm h^{-1} average rainfall intensity, seed displacement in bare soil increased exponentially with runoff and soil loss ($r^2 > 0.75$). When mulch was covering the soil surface, this relation was linear ($r^2 > 0.75$). For the 10% slope, increasing the rainfall intensity produced a linear relationship between seed displacement, runoff and soil loss. In fact, in our study, seed displacement had a strong positive relationship with soil loss and an even a stronger one with runoff (as also observed by Han et al., 2011). Similar to what happens with soil particles, reduction in seed transport due to the presence of mulch results from: i) protecting the seeds from the direct impact of raindrops and reducing their transport by the splash effect; ii) higher hydraulic roughness, which reduces runoff velocity and thereby reduces runoff transport capacity; and iii) seed retention in the mulch itself.

Figure 7. Relation between seed displacement and: a) Runoff; b) Soil loss. Only the 45 mm h⁻¹ rainfall event is not shown. Values are averages of 3 repetitions and for 10, 30, 50 and 70% surface slope and mulched soil: uniform, advanced and delayed rainfall patterns and rainfall intensity (all significant at the level of 0.05).

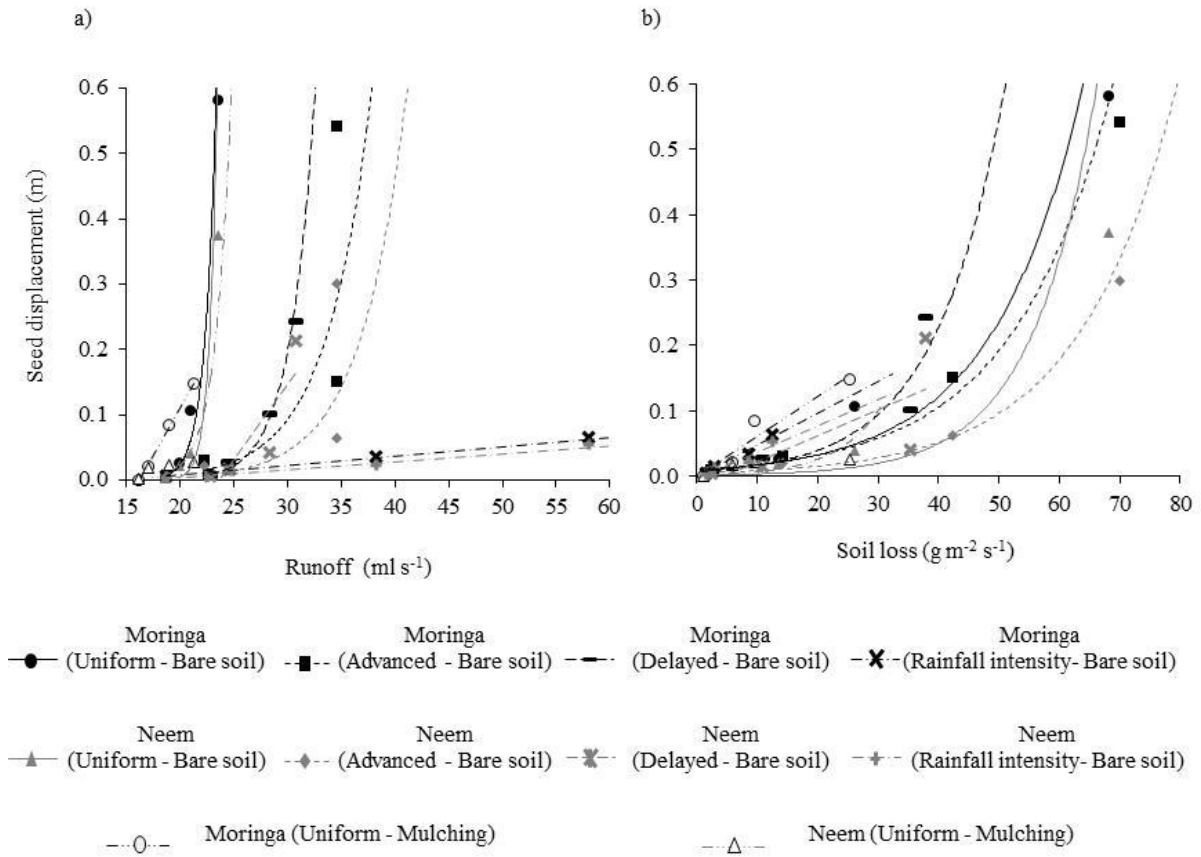


Figure 8 presents the overland flow velocity patterns measured by infrared thermography, which explains seed displacement. For both bare soil and mulched conditions, the relationship between seed displacement and runoff velocity is highly dependent of the slope (Figure 9a to 9d) and rainfall intensity (Figure 9e and 9f). The 10 and 30% slopes did not produce any seed washout, even for the extremely high intensity rainfall event of 270 mm h⁻¹. On average, seed washout in bare soil conditions and 50% slope accounted for 22 and 16% of the total moringa and neem seeds, respectively. These figures increased to 85% for the 70% slope. Under mulched conditions, seed washout of moringa was 19 and 36%, and of neem it was 11 and 33% for the 50 and 70% slopes, respectively. As noted before, the 50 and 70% slopes induced extreme rill formation, with 0.05 m deep rills (depth of the soil layer) that did not form in the other slopes. This aspect could be directly related to the high seed washout that occurred on these slopes.

Figure 8. Runoff velocity patterns measured by infrared thermography, for both bare soil and soil under mulch, for different slopes and rainfall intensities.

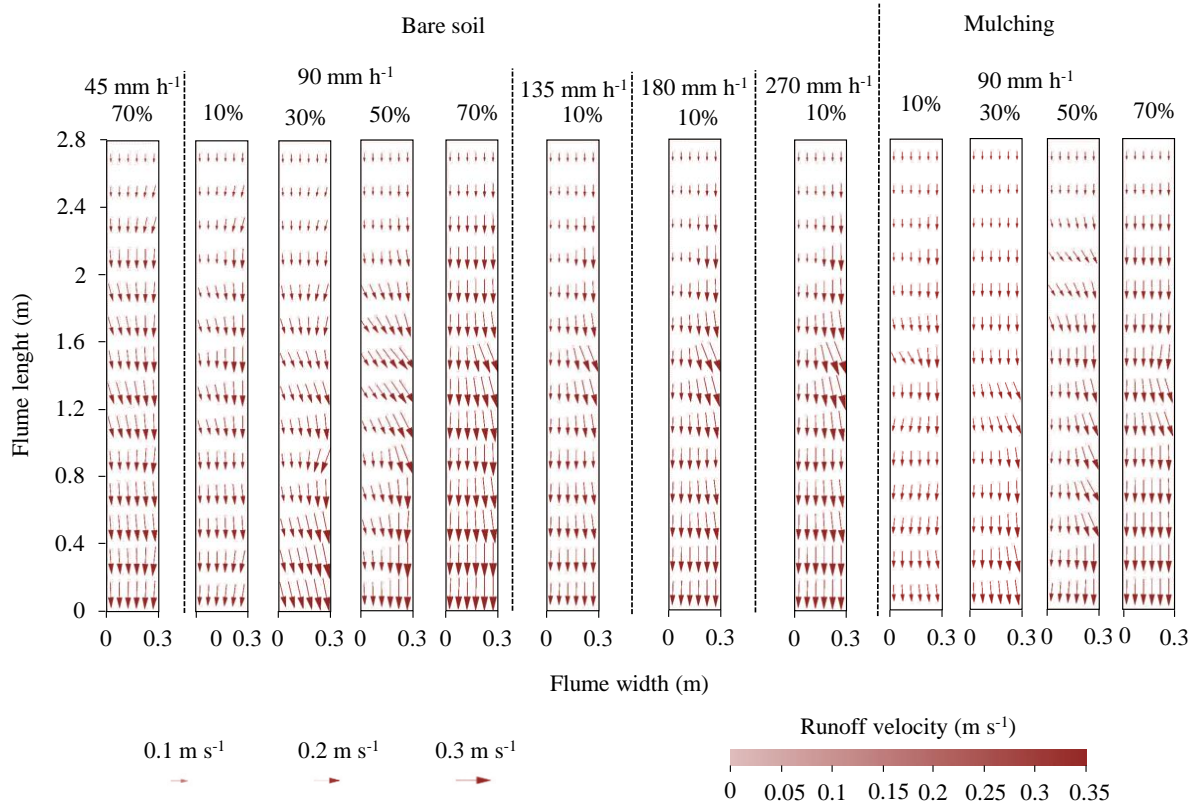
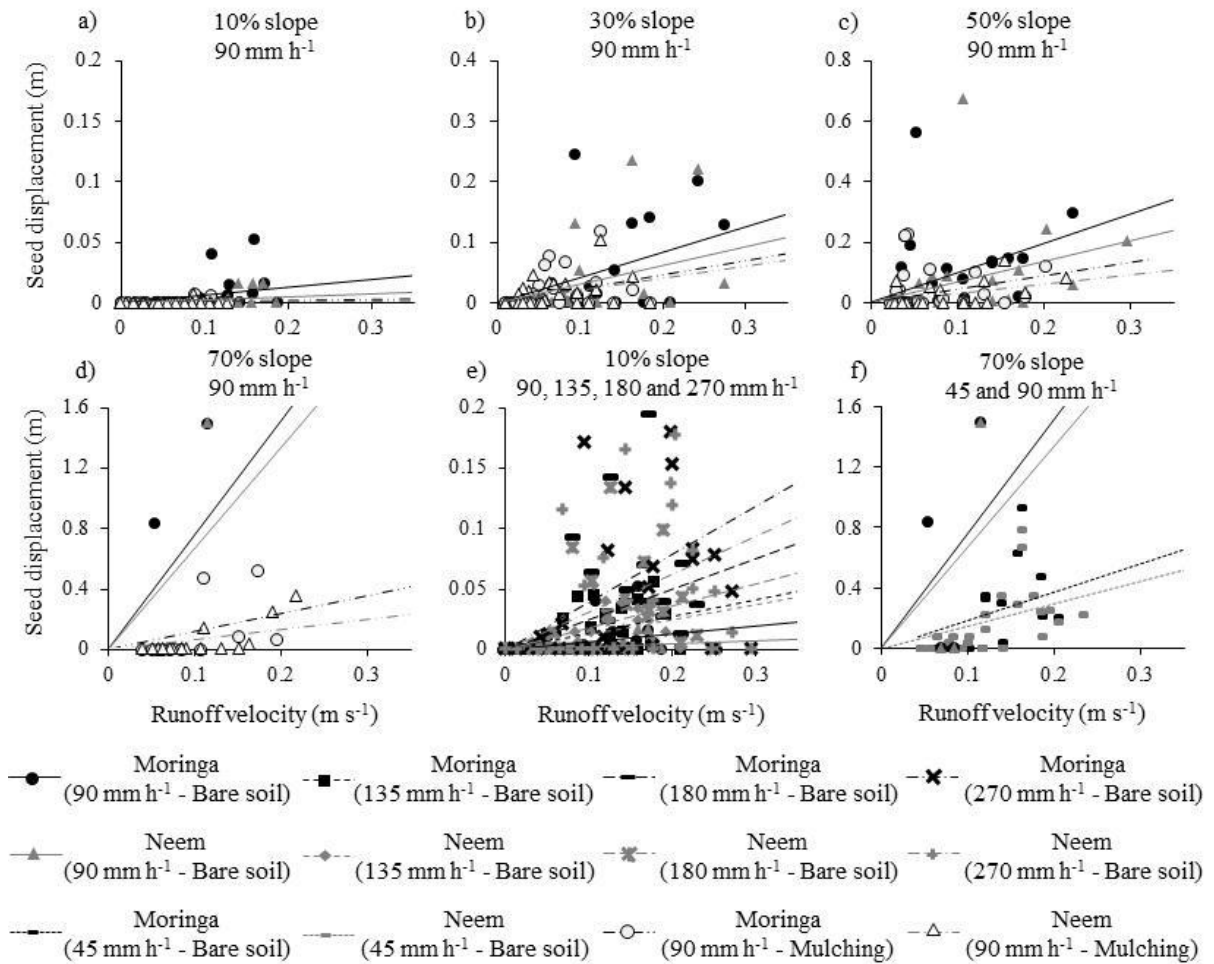


Figure 9. Relation between seed displacement and runoff velocity for: a) Rainfall intensity of 90 mm h⁻¹ for 10% slope; b) Rainfall intensity of 90 mm h⁻¹ for 30% slope; c) Rainfall intensity of 90 mm h⁻¹ for 50% slope; d) Rainfall intensity of 90 mm h⁻¹ for 70% slope; e) Rainfall intensities of 90, 135, 180 and 270 mm h⁻¹ for 10% slope; and f) Rainfall intensities of 45 and 90 mm h⁻¹ for 70% slope. In a), b), c) and d) both bare soil and soil under mulch are shown.



4. CONCLUSIONS

In this study seed transport was found to be strongly related to slope, rainfall intensity, runoff, soil loss, seed characteristics and soil surface characteristics and mulch cover. As with the soil particle behaviour, seed transport by runoff increased with rainfall intensity and surface slope and decreased with mulching. Lighter and more spherical moringa seeds were more easily transported by runoff than flatter neem seeds. Extreme soil erosion on 50 and

70% slopes led to deep rills developing (up to 0.05 m), clearly supporting seed washout, and it should be further explored.

This study suggests applying an erosion control mulch (e.g. coconut powder) and using heavier flatter seeds for vegetation restoration in steeply sloping areas highly prone to the soil erosion and heavy rainfall events like those in the semiarid region of Pernambuco in the northeast Brazil. Mulching also enhances infiltration and preserves higher soil moisture content, which is of great importance in the vegetation restoration process.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by program for Special Visiting Researcher of the scientific mobility program Science Without Borders, funded by CNPq, Brazil, by the project HIRT – “Modelling surface hydrologic processes based on infrared thermography at local and field scales” (PTDC/ECM-HID/4259/2014 – POCI-01-0145-FEDER-016668), funded by FCT, Portugal, and FEDER. The first author acknowledges CNPq, Brazil, for the Doctoral grant in the sandwich modality 207338/2015-9 and the FACEPE, Brazil, for the Doctoral grant in the Agricultural Engineering program of UFRPE, Brazil. The fourth author acknowledges FCT, Portugal, for the Doctoral grant SFRH/BD/103300/2014. The sixth author acknowledges CNPq, Brazil, for the Post-Doctoral Grant 206872/2014-3.

6. REFERENCES

AERTS, R.; WOUTER, M.; NOVEMBER, E.; BEHAILU, M.; POESEN, J.; DECKERS, J.; HERMY, M.; MUYS, B. Surface runoff and seed trapping efficiency of shrubs in a regenerating semiarid woodland in northern Ethiopia. *Catena*, v. 65, n. 61-70, 2006.

BOCHET, E. The fate of seeds in the soil: a review of the influence of overland flow on seed removal and its consequences for the vegetation of arid and semiarid patchy ecosystems. *Soil*, v. 1, n. 131-146, 2015.

CERDÀ, A.; GARCÍA-FAYOS, P. The influence of slope angle on sediment, water and seed washouts on badland landscapes. **Geomorphology**, v. 18, n. 77-90, 1997.

CERDÀ, A., GARCÍA-FAYOS, P. The influence of seed size and shape on their removal by water erosion. **Catena**, v. 48, n. 293-301, 2002.

de LIMA, J. L. M. P.; ABRANTES, J. R. C. B. Using a thermal tracer to estimate overland and rill flow velocities. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 39, n. 1293-1300, 2014.

de LIMA, J. L. M. P.; SIMÕES, N.; REDONDO, J.; de LIMA, M. I. P. Estudo laboratorial do deslocamento de sementes de *Pinus pinea*, *Pinus pinastere* *Grevillea sp.* sob ação de chuva simulada. **Silva Lusitana**, v. 14, n. 219-226, 2006.

de LIMA, J. L. M. P.; SINGH, V. P.; de LIMA, M. I. P. The influence of storm movement on water erosion: storm direction and velocity effects. **Catena**, v. 52, n. 39-56, 2003.

de LIMA, R. L. P.; ABRANTES, J. R. C. B.; de LIMA, J. L. M. P.; DE LIMA, M. I. P. Using thermal tracers to estimate flow velocities of shallow flows: laboratory and field experiments. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 63, n. 255-262, 2015.

EMMERSON, L.; FACELLI, J. M.; CHESSON, P.; POSSINGHAM, H. Secondary seed dispersal of *Erodiophyllum elderi*, a patchily distributed short-lived perennial in the arid lands of Australia. **Austral Ecology**, v. 35, n. 906-918, 2010.

FERNÁNDEZ, C.; VEGA, J. A.; JIMÉNEZ, E.; VIEIRA, D. C. S.; MERINO, A., FERREIRO, A.; FONTURBEL, T. Seeding and mulching and seeding effects on post-fire runoff, soil erosion and species diversity in Galicia (NW Spain). **Land Degradation & Development**, v. 23, n. 150-156, 2012.

GARCÍA-FAYOS P.; CERDÀ, A. Seed washouts by surface wash in degraded Mediterranean environments. **Catena**, v. 29, n. 73-83, 1997.

GARCÍA-FAYOS P.; BOCHET, E.; CERDÀ, A. Seed removal susceptibility through soil erosion shapes vegetation composition. **Plant Soil**, v. 334, n. 289-297, 2010.

HAN, L.; JIAO, J.; JIA, Y.; WANG, N.; LEI, D.; LI, L. Seed removal on loess slopes in relation to runoff and sediment yield. **Catena**, v. 85, n. 12-21, 2011.

ISSELIN-NONDEDEU, F.; REY, F.; BÉDÈCARRATS, A. Contributions of vegetation cover and cattle hoof prints towards seed runoff control on ski pistes. **Ecological Engineering**, v. 27, n. 193-201, 2006.

KAFUKU, G.; MBARAWA, M. Alkaline catalyzed biodiesel production from *Moringa oleifera* oil with optimized production parameters. **Applied Energy**, 87, 2561-2565, 2010.

Michereff, S.J. 2009. Tutorial do programa “STATISTIX® 9.0” - **Análise estatística aplicada à fitopatologia**, 54 p.

MONTENEGRO, A. A. A., ABRANTES, J. R. C. B., DE LIMA, J. L. M. P., SINGH, V. P., SANTOS, T. E. M. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. **Catena**, v. 109, n. 139-149, 2013.

ROZINA, ASIF, S.; AHMAD, M.; ZAFAR, M.; NSIR, A. Prospects and potential of fatty acid methyl esters of some non-edible seed oils for use as biodiesel in Pakistan. **Renew. Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 74, n. 687-702, 2017.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A. Erosividade e padrões hidrológicos de precipitação no Agreste Central pernambucano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 871-880, 2012.

STATSOFT INC., 2011. Statistica™ (data analysis software system), version 9. Available at:<http://www.statsoft.com>.

THOMPSON, S. E.; ASSOULINE, S.; CHEN, L.; TRAHKTENBROT, A.; SVORAY, T.; KATUL, G. Secondary dispersal driven by overland flow in drylands: Review and mechanistic model development. **Movement Ecology**, v. 2, n. 1-13, 2014.

WANG, D.; JIAO, J. Y.; LEI, D.; WANG, N.; DU, H.; JIA, Y. Effects of seed morphology on seed removal and plant distribution in the Chinese hill-gully Loess Plateau region. **Catena**, v. 104, n. 144-152, 2013.

WANG, N.; JIAO, J. Y.; LEI, D.; CHEN, Y.; WANG, D. L. Effect of rainfall erosion: Seedling damage and establishment problems. **Land Degradation & Development**, v. 25, n. 565-572, 2014.

YU, W. J.; JIAO, J. Y.; CHEN, Y.; WANG, D. L.; WANG, N.; ZHAO, H. K. Seed removal due to overland flow on abandoned slopes in the Chinese hilly-gullied loess plateau region. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 274-282, 2016.

CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES

Esses resultados experimentais são complementares a outros estudos realizados em laboratório, e validam em condição de campo observações anteriormente obtidas, dentro do escopo da Cooperação Científica entre a Universidade Federal Rural de Pernambuco e a Universidade de Coimbra, Portugal, reforçando a relevância da cobertura morta e vegetal na retenção de umidade em solos rasos do semiárido, mesmo considerando o consumo hídrico de culturas oleaginosas.

O cultivo de espécies alternativas do solo (moringa e neem) associado com cobertura morta diminuiu o impacto das gotas de chuva no solo, a qual possibilitaram menores perdas de água e solo, maiores teores de umidade do solo, menor temperatura do solo, quando comparado ao solo descoberto. Esse rápido desenvolvimento das oleaginosas em condições de sequeiro é um indicativo de que essas espécies podem ser utilizadas na recomposição de áreas degradadas no semiárido brasileiro.

Recomenda-se aplicação de cobertura morta (pó de coco) no controle da erosão e o uso de sementes mais pesadas e planas para a recomposição da vegetação em áreas em declives acentuados, altamente propensas à erosão do solo e a eventos intensos, principalmente na região semiárida do Nordeste brasileiro.

Recomenda-se continuar as investigações dos processos hidrossedimentológicos em nível de parcelas experimentais, de modo a possibilitar um banco de dados, para dar suporte à gestão de recursos hídricos e a conservação do solo, e fornecer subsídios para utilização de modelos e geração de cenários futuros.

Recomenda-se utilizar parcelas mais longas, tais como parcelas de 20 m investigadas neste estudo, representou melhor as heterogeneidades do sistema, relevo e dos processos erosivos.