

JOSÉ AILDO SABINO DE OLIVEIRA JÚNIOR

**PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS DE UM NEOSSOLO REGOLÍTICO SOB
PASTAGEM E CAATINGA NO AGRESTE PERNAMBUCANO**

GARANHUNS, PERNAMBUCO - BRASIL
DEZEMBRO – 2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE GARANHUNS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO AGRÍCOLA**

**PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS DE UM NEOSSOLO REGOLÍTICO SOB
PASTAGEM E CAATINGA NO AGRESTE PERNAMBUCANO**

JOSÉ AILDO SABINO DE OLIVEIRA JÚNIOR

SOB ORIENTAÇÃO DO PROFESSOR
MARCELO METRI CORRÊA

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Produção Agrícola, para obtenção do título de *Mestre*.

GARANHUNS, PERNAMBUCO - BRASIL
DEZEMBRO – 2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE GARANHUNS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO AGRÍCOLA**

**PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS DE UM NEOSSOLO REGOLÍTICO SOB
PASTAGEM E CAATINGA NO AGRESTE PERNAMBUCANO**

JOSÉ AILDO SABINO DE OLIVEIRA JÚNIOR

**GARANHUNS, PERNAMBUCO - BRASIL
DEZEMBRO – 2012**

Ficha Catalográfica
Setor de Processos Técnicos da Biblioteca Setorial UFRPE/UAG

O48p Oliveira Junior, José Aildo Sabino de
 Propriedades hidrodinâmicas de neossolo regolítico sob
 pastagem e caatinga no Agreste Pernambucano/José Aildo
 Sabino de Oliveira Junior. _Garanhuns, 2013.

 90f.

 Orientador: Marcelo Metri Corrêa
 Dissertação (Mestrado em Produção Agrícola) –
 Universidade Federal Rural de Pernambuco- Unidade
 Acadêmica de Garanhuns, 2012.
 Inclui apêndices e bibliografias

CDD: 631.51

1. Manejo do solo
 2. Pastagens-cultivo
 3. Caatinga
- I. Corrêa, Marcelo Metri
 - II. Título

**PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS DE UM NEOSSOLO REGOLÍTICO SOB
PASTAGEM E CAATINGA NO AGRESTE PERNAMBUCANO**

JOSÉ AILDO SABINO DE OLIVEIRA JÚNIOR

APROVADO EM 17 DE DEZEMBRO DE 2012

José Romualdo de Sousa Lima
(UAG-UFRPE)

Willames de Albuquerque Soares
(UPE)

Marcus Metri Corrêa
(UFRPE)

Marcelo Metri Corrêa
(Orientador)
(UAG-UFRPE)

Dedicatória

À minha mãe Cabral
Ao meu pai Aildo (“in memoriam”).
Aos meus parentes e amigos.
Ao meu grande amor Taciane.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me amado e pelo seu cuidado. Por ter criado as oportunidades para que eu alcançasse meus objetivos e me concedido sabedoria.

À minha mãe Cabral que sê doou para que eu conseguisse realizar meus sonhos.

À minha namorada Taciane pela paciência, apoio, conselhos e todo amor que me deu durante essa jornada.

A todos os amigos e amigas de Mestrado os quais destaco Esio, João Paulo, Raquel, Camila e Kristal.

A todos os amigos da APAC pelo companheirismo e apoio nos momentos difíceis, em especial nossa gerente Terezinha Uchôa, pela compreensão.

Aos amigos Edjalma, Karlos, Luiz, Elves e Rodolfo que ajudaram nos trabalhos de campo e laboratório.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco - Unidade Acadêmica de Garanhuns, Programa de Pós Graduação em Produção Agrícola, na pessoa do Professor Dr Gustavo Duda, pela oportunidade de realização do mestrado.

À Capes, pela concessão de bolsa de estudo.

Aos Professores Dr. Marcelo Metri Corrêa e Dr. Eduardo Soares de Souza pela orientação, supervisão e apoio na elaboração deste trabalho.

Ao Laboratório de Solo da UAG, pelas instalações e equipamentos utilizados.

Agradeço a todos os meus professores da Pós-graduação pela contribuição que deram ao meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional durante todo o curso.

Ao Sr. Antônio de Pádua Montenejo, proprietário da Fazenda Riacho do Papagaio, pela disponibilização da área experimental.

Às demais pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e todas as conquistas da minha vida, o meu agradecimento.

BIOGRAFIA

José Aildo Sabino de Oliveira Junior, filho de José Aildo Sabino de Oliveira e Maria José Cabral, nascido em 06 de junho de 1986 em Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco.

Em 2005, ingressou no Curso de Licenciatura Plena em Matemática pela Universidade de Pernambuco, graduando-se em janeiro de 2009.

Em 2005, ingressou no Curso de Engenharia Agrônômica da Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Garanhuns, graduando-se em agosto de 2010.

Em 2010, entrou para Secretaria de Educação do Estado de Pernambuco, onde desempenha a função de Professor até hoje.

Em 2010, ingressou no Curso de Pós Graduação em Produção Agrícola, tendo defendido sua dissertação em dezembro de 2012.

Em 2012, assumiu o Cargo de Analista de Meio Ambiente na Agência Pernambucana de Águas e Clima, na qual vêm desempenhado suas funções até o presente.

SUMARIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tabelas.....	iv
Lista de Símbolos.....	v
Lista de Tabelas dos Apêndices.....	vi
1 INTRODUÇÃO.....	15
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
2.1. Descrição dos sítios experimentais.....	20
2.2. Caracterização da malha experimental e amostragens.....	21
2.3. Procedimento experimental dos ensaios de infiltração.....	22
2.4. Procedimento experimental para obtenção da curva granulométrica.....	24
2.5. Metodologia Beerkan.....	24
2.5.1. Determinação dos parâmetros de forma (m , n e η).....	25
2.5.2. Determinação dos parâmetros de normalização (θ_s , K_s e h_g).....	27
2.6. Escalas características.....	30
2.7. Análise estatística e geoestatística.....	31
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
3.1. Comportamento das componentes texturais e de infiltração em solo sob pastagem e sob caatinga.....	35
3.2. Comportamento das propriedades dos solos das áreas de pastagem e de caatinga.....	48
3.2.1. Propriedades físico-hídricas (ρ_s , θ_0 e θ_s).....	48
3.2.2. Parâmetros de forma das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ (m , n e η).....	54
3.2.3. Parâmetros hidrodinâmicos (S , K_s e h_g).....	59
3.2.4. Escalas características (λ_m e $C_{\lambda m}$).....	64
3.3. Curvas de retenção e da condutividade hidráulica da água no solo.....	68
4. CONCLUSÕES.....	74
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
APÊNDICES.....	85

RESUMO

O cultivo dos solos acarreta em modificações em seus atributos, dependendo da intensidade de preparo e manejo utilizado. A degradação do solo, decorrente da compactação, destruição da estrutura e da degradação da matéria orgânica, provoca efeitos negativos nas propriedades físicas, químicas e biológicas, com prejuízos ao desenvolvimento de plantas e conseqüentemente afetando a produtividade desses solos. Buscou-se nesse trabalho avaliar o impacto da pastagem nas propriedades hidrodinâmicas de um Neossolo Regolítico no Agreste de Pernambuco, analisando a variabilidade espacial dos parâmetros das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ descritas, respectivamente, pelos modelos de van Genuchten (1980) e de Brooks & Corey (1964), obtidas a partir da metodologia denominada Beerkan em duas áreas, uma área de pastagem (*Brachiaria decumbens*) e outra de mata nativa (Caatinga). Os parâmetros de forma (m , n e η) das curvas de $\theta(h)$, dependentes majoritariamente da textura do solo são obtidos a partir da curva de distribuição dos tamanhos das partículas, enquanto que os parâmetros de normalização (θ_0 , K_s e h_g) dependentes, essencialmente, da estrutura do solo são obtidos a partir dos ensaios de infiltração utilizando-se o infiltrômetro de anel simples. Os resultados mostraram que o uso do solo com pastagem alterou significativamente as propriedades analisadas quando comparada com o solo com caatinga, sendo que as alterações mais expressivas encontradas foram na densidade do solo e na condutividade hidráulica. A análise geoestatística identificou a existência de estrutura de dependência espacial dos atributos estudados permitindo o mapeamento das áreas experimentais, este definiu zonas de maior ou menor variabilidade das propriedades analisadas para fins estratégicos de manejo do solo.

Palavra-chave: Manejo do solo, Beerkan, Geoestatística.

ABSTRACT

Soil cultivation leads to modifications in its attributes, depending on the staging intensity and management used. Soil degradation, due to the compaction, destruction of its structure and oxidation of organic matter, results in negative effects on its properties. Thus causing damage to the development of plants, and reducing the productivity of these soils. The main objective of this study is evaluating the impact of grazing on the hydrodynamic properties of Regolithic Neosols in the semi-arid "Agreste" region of Pernambuco State, Brazil, analyzing the spatial variability of the parameters in the curves $\theta(h)$ and $K(\theta)$ described by models from van Genuchten (1980) and Brooks & Corey (1964), respectively. Such curves were obtained from application of Beerkan method in two areas, the first is an area of pastures (*Brachiaria decumbens*) and the second is a native forest (Caatinga). The shape parameters (m, n e η) from the curves $\theta(h)$ and $K(\theta)$ largely dependent on soil texture and are obtained from the particle-size distribution. In turn, the parameters for standardization (θ_0, K_s e hg) are dependent on the soil structure and are obtained from infiltration tests using the simple ring infiltrometer. The results showed that the use of pasture soil with these properties altered significantly when compared with the soil caatinga, and that the most significant changes were found in soil density and hydraulic conductivity. The geostatistic analysis identified the existence of an structure of dependency between the studied attributes allowing the mapping of experimental areas, this defined zones of greater or lesser variability of the properties analyzed for strategic purposes soil management.

Keyword: Soil management, Beerkan, Geostatistic.

Lista de Figuras

Figura 1. Imagem Google Earth, evidenciado as duas áreas experimentais onde foram realizados os ensaios de infiltração e as coletas de solo, pastagem (a) e caatinga (b)..	21
Figura 2. Distribuição dos pontos onde foram realizados os ensaios de infiltração e as coletas de solo na pastagem (a) e na caatinga (b)	22
Figura 3. Teste de infiltração tridimensional com infiltrômetro de anel (150 mm de diâmetro)	23
Figura 4. Procedimento do ensaio de infiltração	23
Figura 5. Curvas granulométricas em solo sob pastagem (a) e sob caatinga (b)	35
Figura 6. Classes textuais de um Neossolo Regolítico sob pastagem (a), e sob caatinga (b).	36
Figura 7. Semivariogramas experimentais e teóricos da % de areia, silte e argila do solo sob pastagem (a, b e c) e sob caatinga (d, e e f)	39
Figura 8. Mapa de isolinhas para as percentagens de areia, silte e argila em solo sob pastagem e sob caatinga	42
Figura 9. Semivariogramas experimental e teórico dos parâmetros da $F(D)$ do solo sob pastagem (a, b e c), e sob caatinga (d, e e f)	44
Figura 10. Curvas de infiltração acumulada em função do tempo nos solos sob pastagem (a) e sob caatinga (b)	47
Figura 11. Semivariogramas experimental e teórico das propriedades físico-hídricas, ρ_s , θ_0 e θ_s do solo sob pastagem (a, b e c), e sob caatinga (d, e e f)	50
Figura 12. Mapa de isolinhas para as propriedades físico-hídricas, ρ_s , θ_0 e θ_s do solo sob pastagem e sob caatinga	53
Figura 13. Semivariogramas experimental e teórico dos parâmetros de forma das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ (m , n e η) do solo sob pastagem (a, b e c), e sob caatinga (d, e e f)	56
Figura 14. Mapa de isolinhas para os parâmetros de forma das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ (m , n e η) do solo sob pastagem e sob caatinga	58
Figura 15. Semivariogramas experimental e teórico dos parâmetros hidrodinâmicos (S , K_s e h_g) do solo sob pastagem (a, b e c), e sob caatinga (d, e e f)	61
Figura 16. Mapa de isolinhas para os parâmetros hidrodinâmicos (S , K_s e h_g) do solo sob pastagem e sob caatinga	63
Figura 17. Semivariogramas experimental e teórico das escalas características (λ_m e C_{λ_m}) do solo sob pastagem (a e b), e sob caatinga (c e d)	66
Figura 18. Mapa de isolinhas para as escalas características (λ_m e C_{λ_m}) do solo sob pastagem e sob caatinga	68
Figura 19. Curvas de retenção da água no solo sob pastagem (a) e sob caatinga (b)	69
Figura 20. Curvas de retenção médias para o solo sob pastagem e sob caatinga	70
Figura 21. Curva de condutividade hidráulica no solo sob pastagem (a) e sob caatinga (b)	72
Figura 22. Curvas de condutividade hidráulica médias para o solo sob pastagem e sob caatinga.	73

Lista de Tabelas

Tabela 1. Estatística das frações granulométricas	38
Tabela 2. Geoestatística dos componentes texturais.....	40
Tabela 3. Estatística dos parâmetros da curva granulométrica ($F(D)$)	43
Tabela 4. Geoestatística dos parâmetros da curva granulométrica do solo sob pastagem e solo sob caatinga	45
Tabela 5. Estatística das propriedades físico-hídricas dos solos sob pastagem e sob caatinga	49
Tabela 6. Geoestatística das propriedades físico-hídricas do solo sob pastagem e sob caatinga	51
Tabela 7. Estatística dos parâmetros de forma das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ (m , n e η) do solo sob pastagem e sob caatinga.....	55
Tabela 8. Geoestatística dos parâmetros de forma das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ do solo sob pastagem e sob caatinga.....	57
Tabela 9. Estatística dos Parâmetros hidrodinâmicos (S , K_s e h_g) do solo sob pastagem e sob caatinga	59
Tabela 10. Geoestatística dos parâmetros hidrodinâmicos (S , K_s e h_g) do solo sob pastagem e sob caatinga.....	62
Tabela 11. Estatística das escalas características (λ_m e C_{λ_m}) dos solos sob pastagem e sob caatinga	65
Tabela 12. Geoestatística das Escalas características (λ_m e C_{λ_m}) do solo sob pastagem e sob caatinga	67

Lista de Símbolos

A	Alcance	[m]
C_0	Efeito pepita	
C_1	Variância de dispersão	
D	Diâmetro efetivo de uma partícula de solo	[μm]
D_f	Dimensão fractal do solo	
D_g	Parâmetro de escala do tamanho das partículas	[μm]
E	Dimensão de Euclides	
$F(D)$	Distribuição do tamanho das partículas	
g	Aceleração da gravidade	[m.s^{-2}]
h	Potencial matricial	[m]
h_f	Pressão matricial na frente da infiltração	[mm]
h_g	Potencial de entrada de ar	[mm]
$K(\theta)$	Curva de condutividade hidráulica	[mm.s^{-1}]
K_s	Condutividade hidráulica saturada do solo	[mm.s^{-1}]
M e N	Parâmetros de forma da curva de $F(D)$	
n e m	Parâmetros de forma de $\theta(h)$	
p	Parâmetro de tortuosidade	
$q(t)$	Densidade de fluxo de água	[mm.s^{-1}]
s	Dimensão fractal relativa do solo	
S	Sorvidade do solo	[$\text{mm.s}^{-1/2}$]
$\theta(h)$	Curva de retenção da água no solo	
θ	Umidade volumétrica	[$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$]
θ_0	Umidade volumétrica inicial	[$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$]
θ_r	Umidade residual	[$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$]
θ_s	Umidade volumétrica final	[$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$]
$\mu\nu d$	Coefficiente de viscosidade dinâmica	[$\text{Kg.mm}^{-1}\text{s}^{-1}$]
$\gamma(h)$	Semivariância	
η	Parâmetro de forma de $K(\theta)$ da eq. de Brooks & Corey	
ρ_a	Massa específica da água	[1000 kg m^{-3}]
ϕ	Porosidade total do solo	[$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$]
ρ_s	Densidade do solo	[g.cm^{-3}]
λ_c	Escala de comprimento capilar	[mm]
λ_m	Raio característico de poros	[mm]
$C\lambda_m$	Concentração de raios característicos de poros	[poros. m^{-2}]

Lista de Tabelas dos Apêndices

Tabela A 1. Teste de distribuição Kolmogorov - Smirnov das componentes texturais do solo sob pastagem	85
Tabela A 2. Teste de distribuição Kolmogorov - Smirnov das componentes texturais do solo sob caatinga	85
Tabela A 3. Teste de distribuição Kolmogorov - Smirnov dos parâmetros N , M e D_g do solo sob pastagem	85
Tabela A 4. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov dos parâmetros N , M e D_g do solo sob caatinga	85
Tabela A 5. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov dos parâmetros ρ_s , θ_0 e θ_s do solo sob pastagem	86
Tabela A 6. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov dos parâmetros ρ_s , θ_0 e θ_s do solo sob caatinga	86
Tabela A 7. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov dos parâmetros m , n e η do solo sob pastagem	86
Tabela A 8. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov dos parâmetros m , n e η do solo sob caatinga	86
Tabela A 9. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov dos parâmetros S , K_s e h_g do solo sob pastagem	87
Tabela A 10. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov dos parâmetros S , K_s e h_g do solo sob caatinga	87
Tabela A 11. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov das escalas características λ_m e $C\lambda_m$ do solo sob pastagem	87
Tabela A 12. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov das escalas características λ_m e $C\lambda_m$ do solo sob caatinga	87
Tabela A 13. Teste-F: Densidade do solo sob caatinga e sob pastagem	88
Tabela A 14. Teste-F: Umidade inicial do solo sob caatinga e sob pastagem	88
Tabela A 15. Teste-F: Umidade final do solo sob caatinga e sob pastagem	88
Tabela A 16. Teste-F: Parâmetro m do solo sob caatinga e sob pastagem	88
Tabela A 17. Teste-F: Parâmetro n do solo sob caatinga e sob pastagem	89
Tabela A 18. Teste-F: Parâmetro η do solo sob caatinga e sob pastagem	89
Tabela A 19. Teste-F: Parâmetro S do solo sob caatinga e sob pastagem	89
Tabela A 20. Teste-F: Parâmetro K_s do solo sob caatinga e sob pastagem	89
Tabela A 21. Teste-F: Parâmetro h_g do solo sob caatinga e sob pastagem	90
Tabela A 22. Teste-F: Escala λ_m do solo sob caatinga e sob pastagem	90
Tabela A 23. Teste-F: Escala $C\lambda_m$ do solo sob caatinga e sob pastagem	90

1 INTRODUÇÃO

O Agreste Pernambucano é uma região de transição entre a Zona da Mata e o Sertão, estendendo-se por uma área de aproximadamente 24.400 km². Representa 24,7% do território Estadual englobando as Regiões de Desenvolvimento: Agreste Meridional, Central e Setentrional. O Agreste Meridional é constituído por 26 municípios e é caracterizado por uma economia diversificada, com cultivos de lavouras como milho, feijão e mandioca, além da pecuária de leite e de corte (MONTEIRO et al., 2007; CARVALHO et al., 2009). A economia dessa região concentra-se na pecuária e por esta razão, a atividade leiteira é a sua principal base de sustentação econômica, com produção de leite e derivados de forma artesanal e industrial. As atividades agrícolas, o comércio e a floricultura também são fortes expressões econômicas regionais.

O clima da região é variado com características tanto do sertão como da zona da mata. De acordo com a classificação de Köppen, o clima na região é do tipo As, que caracteriza-se por ser tropical com verão seco e estação chuvosa no outono. O relevo também produz alterações climáticas devido à altitude, algumas microrregiões apresentam temperaturas menores e índices pluviométricos mais generosos, localmente essas regiões são conhecidas como Brejos de Altitude.

Os solos mais representativos da região são os Neossolos Litólicos (25,53%), Planossolos (23,54%), Argissolos (20,48%), Neossolos Regolíticos (10,15%), Luvisolos (3,43%) e Neossolos Quartzarênicos (2,12%) (ARAÚJO FILHO, 2000). Os Neossolos Regolíticos são solos com textura arenosa ou média, com baixos teores de argila, normalmente entre 5 e 12%, e teores de silte mais frequentes entre 10 e 20% (SILVA et al., 2001; EMBRAPA, 2006), ocorrem em paisagens com relevo predominantemente suave ondulado e/ou plano. Quase sempre, são fortemente drenados; raramente apresentam fase de pedregosidade e, em alguns casos, ocorrem com fase rochosa. Nota-se a presença deste solo em diversas áreas do ambiente semiárido, sendo a maior concentração, nos municípios de Venturosa, Garanhuns, Pesqueira, Belo Jardim, São João, Bom Conselho, Buíque (ARAÚJO FILHO, 2000). São bastante utilizados na agricultura, embora, a maior parte seja de baixa produtividade. Dentre sua utilização destacam-se as seguintes culturas:

mandioca, pastagem, caju, feijão, melancia, milho, tomate, palma forrageira, mamona e capim elefante.

O cultivo dos solos acarreta em modificações em seus atributos, dependendo da intensidade de preparo e manejo utilizado. A degradação do solo, decorrente da compactação, destruição da estrutura e da degradação da matéria orgânica, provoca efeitos negativos nas propriedades físicas, químicas e biológicas, com prejuízos ao desenvolvimento de plantas e conseqüentemente afetando a produtividade desses solos (BEUTLER et al., 2001; SECCO et al., 2004; SILVA et al., 2006a; LIMA et al., 2007).

Os solos arenosos são considerados ecologicamente muito frágeis, e o uso agrícola destes deveria ser evitado (ZUO et al., 2008). Contudo no Agreste pernambucano, há ocorrência de Neossolos Regolíticos e neste há exploração agrícola, mesmo com a elevada permeabilidade e baixa capacidade de retenção de água (EMBRAPA, 2006).

Mesmo com a elevada profundidade efetiva e alta permeabilidade dos Neossolos Regolíticos (EMBRAPA, 2006), a textura arenosa ao longo do perfil é considerada uma séria limitação referente ao solo (LEPSCH, 1991), uma vez que esta confere aos solos baixa coesão e adesão entre as partículas, tornando-os bastantes suscetíveis à erosão. Não é raro, após intervenção antrópica, a ocorrência de processos erosivos como as voçorocas (KER et al., 1992; BEZERRA et al., 2010), mesmo em áreas pouco declivosas, com conseqüências drásticas, particularmente relacionadas à contaminação (SANTOS et al., 2010), assoreamento dos cursos de água (OLIVEIRA et al., 2001), e aumento dos riscos de desertificação (CORRÊA, 1997). Apesar da baixa aptidão para o cultivo de lavouras de ciclo anual, várias áreas de ocorrências desses solos foram incorporadas ao processo de produção de grãos de maneira intensiva, como é notado no município de São João que é um dos maiores produtores de feijão do Estado de Pernambuco com média de 6.500 toneladas ano o que corresponde a 4,8% da produção do Estado de Pernambuco (IBGE, 2006). Outras áreas de ocorrência de Neossolo Regolíticos são usadas como pastagem, contribuindo para produção da bacia leiteira.

O pisoteio intenso de animais em solos úmidos causa a compactação, o que conseqüentemente ocasiona severa redução na macroporosidade, aumento da densidade do solo e redução da infiltração de água nas camadas mais superficiais do solo. Essas

alterações dependem principalmente do tipo de solo, da textura e do teor de matéria orgânica, sendo mais acentuadas em solos argilosos do que em solos arenosos (TANNER & MAMARIL, 1959; TAYLOR & BRAR, 1991; TREIN et al., 1991; BERTOL et al., 1998; FLORES et al., 2007).

A elevada pressão exercida pelos animais sobre o solo se deve ao fato de o seu peso se concentrar em uma pequena área do casco (WILLATT & PULLAR, 1983). Em contrapartida as máquinas agrícolas, apesar de terem peso maior do que os bovinos exercem pressão menor sobre a superfície do solo, uma vez que o seu peso é distribuído em uma área maior (pneus). Vale ressaltar que, quando a carga animal é manejada adequadamente, as alterações nos atributos físicos são pequenas e não causam qualquer dano à cultura em sucessão ao pastejo (SILVA et al., 2000; ALBUQUERQUE et al., 2001; CASSOL, 2003).

Para a implantação de técnicas agrícolas favoráveis, além de se levar em consideração a produção da planta atual, deve-se também considerar que os solos devem manter sua capacidade produtiva (SOUZA, 2005). Com isso, a caracterização hidrodinâmica é fundamental para avaliar os solos quer sejam solos manejados ou solos em condições naturais.

Normalmente, para se realizar estudos e se fazer afirmações sobre propriedades hidrodinâmicas do solo, como curva de retenção da água no solo $\theta(h)$ e a curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$ no campo, é necessário coletar um grande número de informações. Para a caracterização hidrodinâmica dos solos, isso implica em ensaios de campo e laboratoriais bastante dispendiosos que demandam um prolongado período de execução. Diante disso, alguns pesquisadores passaram a utilizar métodos indiretos que se baseiam em dados do solo prontamente disponíveis, usuais e de baixo custo, tais como, a textura, a densidade, a porosidade, o teor de matéria orgânico, dentre outros (WAGENET et al., 1998; MINASNY et al. 1999; MINASNY & MCBRATNEY, 2002). Estas relações são comumente chamadas de funções de pedotransferência, FPT. Entretanto, o desempenho dessas funções depende essencialmente de fatores, tais como: a analogia entre a região de aplicação e a região da base de dados na qual foram geradas as FPT, do clima, da geologia e das técnicas de medidas empregadas (WAGNER et al., 2001; WÖSTEN et al., 2001).

Haverkamp et al. (1996) baseados na teoria do escalonamento, por intermédio da análise dinâmica aplicada a equação de fluxo não saturado, mostraram que a completa identificação dos fatores de escala da equação do fluxo não saturado pode ser efetuada independente da equação de infiltração considerada e das condições de fronteiras impostas. Este trabalho deu origem a metodologia denominado "Beerkan" (HAVERKAMP et al., 1998; SORIA, 2003; BRAUD et al., 2004; LASSABATÈRE et al., 2004; SOUZA et al., 2008; PINHEIRO & TEIXEIRA, 2009) que se baseia principalmente em ensaios simplificados de infiltração e na análise da distribuição dos tamanhos das partículas do solo.

Nessa metodologia, as curvas de retenção da água no solo, $\theta(h)$, e da condutividade hidráulica, $K(\theta)$, podem ser descritas analiticamente por cinco parâmetros: dois de forma e três de normalização. Em comparação a outros métodos experimentais, o método Beerkan é eficiente, de baixo custo, e apresenta uma grande vantagem, pois sua aplicação é bem mais simples e rápida. Tanto as FPT quanto a metodologia Beerkan surgiram com a proposta de melhorar as perspectivas nas análises de variabilidade espacial das propriedades hidráulicas dos solos, a partir das quantidades e qualidades nas estimativas dessas propriedades.

O estudo dos atributos físico-hídricos de um solo é de grande significância, visto que afeta diretamente o próprio uso do solo, uma vez que a partir deste pode-se determinar, o manejo mais adequado a ser adotado, estado de conservação ou efeito da interferência antrópica. A agricultura de precisão se torna neste contexto de grande importância, pois ela leva em consideração a variabilidade espacial dos atributos em estudo, objetivando otimizar a produção, reduzir insumos utilizados e preservar o meio ambiente, para a sua utilização no manejo do solo é preciso fazer um levantamento prévio detalhado dos seus atributos físico-hídricos do solo.

Para fazer tal levantamento é necessário coletar um número muito grande de amostras o que implica no aumento de custos, maior demanda por mão de obra qualificada, análises laboratoriais, processamento e interpretação de dados, porém a geoestatística pode ser aplicada para determinar a existência de variabilidade espacial dos atributos físico-hídrico do solo e diminuir o número de amostras. Para a estimativa de pontos não amostrados, havendo dependência espacial entre eles, utiliza-se a técnica de interpolação da

Krigagem, sendo possível a construção de mapas de isolinha que são de grande valia, pois possibilitam a visualização de zonas que dispõem de maior ou menor variabilidade que poderiam influenciar no manejo do solo.

Segundo Spera et al. (1999), existem muitas informações descritivas sobre os solos arenosos das regiões tropicais. Entretanto, aquelas referentes ao manejo e a conservação dos mesmos ainda são escassas.

Assim pelo exposto buscou-se avaliar o impacto da pastagem nas propriedades hidrodinâmicas de um Neossolo Regolítico no Agreste de Pernambuco, analisando a variabilidade espacial dos parâmetros das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ descritas, respectivamente, pelos modelos de van Genuchten (1980) e de Brooks & Corey (1964), obtidas a partir da metodologia denominada Beerkan em duas áreas: uma área de pastagem (*Brachiaria decumbens*) e outra de mata nativa (Caatinga).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição dos sítios experimentais

O trabalho foi conduzido na fazenda Riacho do Papagaio no Município de São João - PE, cujas coordenadas geográficas são: 07°85'57'' de latitude Sul, 90°26'38'' de longitude Oeste e aproximadamente 690 m de altitude. O campo apresenta uma área de aproximadamente 20 ha (4 ha de caatinga hipoxerófila e 16 ha de pastagem) (Figura 1). As parcelas analisadas consistiram em 3,4 ha de solo com mata nativa (Caatinga) e 4 ha de solo cultivado com pastagem (*Brachiaria decumbens Stapf*). O solo da área em estudo é classificado como Neossolo Regolítico Eutrófico típico (SANTOS et al., 2012), o relevo local é suave ondulado com declividade média de 2,5%.

O município de São João está localizado na Microrregião de Garanhuns, na Mesorregião do Agreste do Estado de Pernambuco, limitando-se a norte com Jupi e Jucati, a sul com Palmeirina, a leste com Angelim, e a oeste com Garanhuns. A área municipal ocupa segundo o IBGE 244,437 km² e representa aproximadamente 0,25% do Estado de Pernambuco. O clima local é segundo a classificação Köppen do tipo BSs'h'.



Figura 1. Imagem Google Earth, evidenciado as duas áreas experimentais onde foram realizados os ensaios de infiltração e as coletas de solo, pastagem (a) e caatinga (b)

2.2. Caracterização da malha experimental e amostragens

Os trabalhos experimentais mediram as propriedades físico-hídricas do solo em malhas de pontos equidistantes de 20 x 20 m, sendo 121 pontos na parcela com pastagem e 104 pontos na parcela com caatinga (Figura 2). Para isso, foram realizados ensaios de infiltração no intuito de compor a análise do comportamento das propriedades hidrodinâmicas na pastagem e na mata nativa. Durante os ensaios, também foram coletadas amostras de solo deformadas na profundidade 0-0,1 m em cada ponto da malha para a determinação da curva granulométrica.

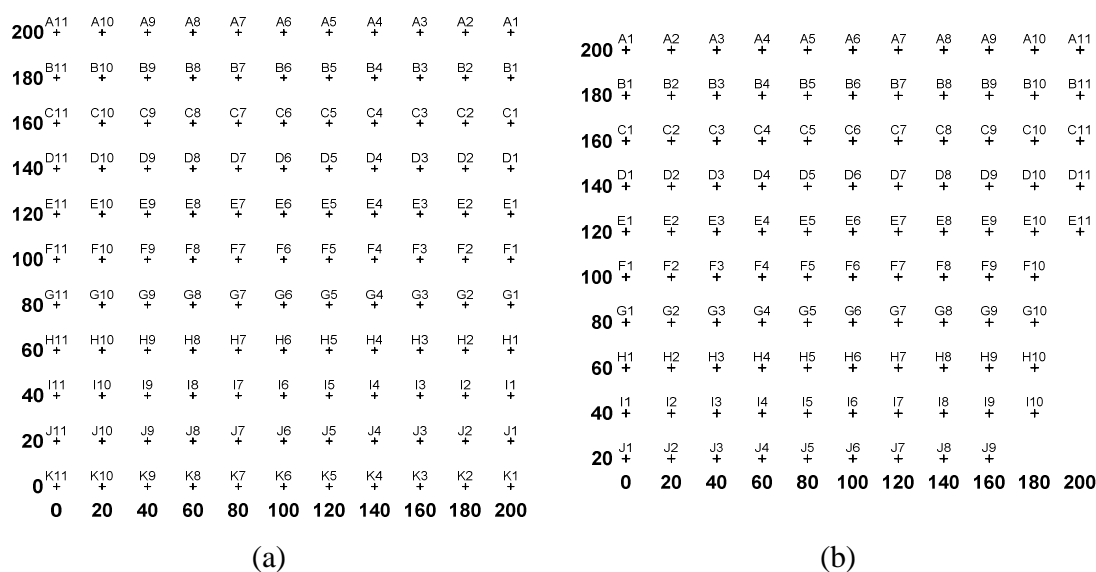


Figura 2. Distribuição dos pontos onde foram realizados os ensaios de infiltração e as coletas de solo na pastagem (a) e na caatinga (b)

2.3. Procedimento experimental dos ensaios de infiltração

Os ensaios de infiltração foram realizados utilizando um infiltrômetro de anel simples com 150 mm de diâmetro (Figura 3). Estes consistem na anotação do tempo em que volumes de água adicionados continuamente (100 mL) levam para infiltrar, encerrando o ensaio quando o fluxo atinge o regime permanente, em média 17 volumes por ponto (Figura 4). Esses ensaios fornecem a infiltração tridimensional $I_{3D}(t)$ em função do tempo (Souza et al., 2008). Durante os ensaios de infiltração foram coletadas amostras indeformadas para determinação da densidade do solo (ρ_s) e amostras deformadas para a determinação dos conteúdos volumétricos de água inicial (θ_0) final (θ_s) e para a obtenção da curva granulométrica.



Figura 3. Teste de infiltração tridimensional com infiltrômetro de anel (150 mm de diâmetro)



Figura 4. Procedimento do ensaio de infiltração

2.4. Procedimento experimental para obtenção da curva granulométrica

A curva granulométrica ou curva de distribuição dos tamanhos das partículas geralmente é obtida utilizando cinco frações granulométricas em média (argila, silte, areia fina, areia média e areia grossa). Para este trabalho, todas as frações foram consideradas, com objetivo de melhorar a precisão do ajuste da curva.

As amostras deformadas coletadas em cada um dos pontos das malhas foram secadas ao ar e passadas por peneira de malha de 2,0 mm. Em seguida, foi retirada uma alíquota de 70 g dessa amostra peneirada e colocada em uma garrafa de Stohlmann, na qual foram acrescentados 280 ml de uma solução de hidróxido de sódio a 0,5 N. A mistura foi posta em agitação por 16 h em agitador horizontal de Wagner e após essa etapa, com ajuda de uma pisseta, o conteúdo foi transferido para uma proveta, que é completada com água destilada até completar o volume de um litro. Cada amostra foi agitada 20 vezes antes de começar as leituras com densímetro. Os tempos de leituras foram: 30'', 1', 2', 4', 8', 15', 30', 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e 24 h. após as leituras, o solo de cada amostra é lavado em uma peneira de malha de 0,053mm, e a areia resultante foi colocada em estufa a 100° C por 24 h para secagem e posterior fracionamento.

Para o fracionamento da areia a amostras secas foram passadas por peneiras com as seguintes malhas: 1.0 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,106 mm e 0,053 mm. A areia que foi retida em cada uma das peneiras é pesada para construção da curva.

2.5. Metodologia Beerkan

Nesta metodologia, são determinados os parâmetros das curvas de retenção da água no solo ($\theta(h)$) e de condutividade hidráulica do solo ($K(\theta)$) descritas pelos modelos de van Genuchten (1980) e de Brooks e Corey (1964) respectivamente:

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} \quad \text{com} \quad m = 1 - \frac{2}{n} \quad (\text{BURDINE, 1953}) \quad (1)$$

$$K(\theta) = K_s \cdot \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (2)$$

sendo θ a umidade volumétrica [$L^3 L^{-3}$]; θ_r e θ_s as umidades volumétricas residual e saturada [$L^3 L^{-3}$], respectivamente; h o potencial matricial [L]; h_g [L] um valor de escala de h ; m e n são parâmetros de forma; K_s a condutividade hidráulica saturada do solo [$L T^{-1}$] e η o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica.

A metodologia Beerkan baseia-se nas propriedades estáticas e dinâmicas do solo, como a curva granulométrica e a curva de infiltração da água no solo, respectivamente, para obter os parâmetros (m , n , η , K_s , h_g).

Para determinação dos parâmetros de forma (m , n e η) e os de normalização (K_s e h_g) foi utilizado o BEST (*Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments*) (LASSABATÉRE et al., 2006).

2.5.1. Determinação dos parâmetros de forma (m , n e η)

Assumindo que há similaridade de forma entre a curva de distribuição do tamanho das partículas $F(D)$ e da curva de retenção da água no solo $\theta(h)$, Haverkamp & Parlange (1986) apresentaram a seguinte equação para expressar $F(D)$:

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M} \quad (3)$$

sendo $F(D)$ a distribuição do tamanho das partículas, D o diâmetro efetivo de uma partícula de solo [L], D_g o parâmetro de escala do tamanho das partículas [L], e M e N os parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas.

Os parâmetros de forma m e n da curva de retenção da água no solo, expresso pela Eq. 1, e η da curva de condutividade hidráulica, equação (2), foram obtidos a partir da textura do solo e, mais especificamente, a partir dos valores de M e N :

$$m = \frac{1}{p_m} \left(\sqrt{1+p_m^2} - 1 \right) \quad (4)$$

$$n = \frac{2}{1-m} \quad (5)$$

p_m é estimado a partir de M e N por (ZATARÁIN et al. 2003):

$$p_m = \frac{M N}{1+M} (1+\kappa)^{-1} \quad (6)$$

sendo que κ um coeficiente definido por Fuentes et al. (1998):

$$\kappa = \frac{2s-1}{2s(1-s)} \quad (7)$$

sendo s a dimensão fractal relativa. A dependência de s ($s = D_f/E$, na qual D_f é a dimensão fractal do solo e $E = 3$ a dimensão de Euclides) com respeito à porosidade total do solo (ϕ) é definida por (Fuentes, 1992):

$$(1-\phi)^s + \phi^{2s} = 1 \quad \text{com } 1/2 < s < 1 \quad (8)$$

O parâmetro de forma da curva de condutividade hidráulica η é obtido pela equação proposta por Burdine (1953):

$$\eta = \frac{2}{nm} + 2 + p \quad (9)$$

com o fator de tortuosidade $p = 1$ Burdine (1953).

2.5.2. Determinação dos parâmetros de normalização (θ_s , K_s e h_g)

O parâmetro de normalização θ_s é obtido partir da umidade gravimétrica saturada (amostra coleta imediatamente após o ensaio de infiltração) e da densidade do solo (ρ_s). Os parâmetros de normalização K_s e h_g são obtidos a partir da modelagem das curvas de infiltração. Para uma fonte de água circular com dado potencial de pressão da água sobre uma superfície de solo (neste caso foi considerado igual a zero) uniforme e com um umidade inicial uniforme (θ_0), a infiltração acumulada tridimensional $I(t)$ e a taxa de infiltração $q(t)$ podem ser aproximadas pelas equações para o regime de fluxo transitório (Eqs. 10 e 11) e estacionário (Eqs. 12 e 13) (HAVERKAMP et al., 1994):

$$I(t) = S\sqrt{t} + [aS^2 + bK_s]t \quad (10)$$

$$q(t) = \frac{2}{2\sqrt{t}} + [aS^2 + bK_s] \quad (11)$$

$$I_{+\infty}(t) = [aS^2 + bK_s] \cdot t + c \frac{S^2}{K_s} \quad (12)$$

$$q_{+\infty}(t) = q_{+\infty} = aS^2 + bK_s \quad (13)$$

com,

$$a = \frac{\gamma}{r\Delta\theta} \quad (14)$$

$$b = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} \cdot \left(1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^\eta \right) \quad (15)$$

$$c = \frac{1}{2 \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right) \right] \cdot (1-\beta)} \ln \left(\frac{1}{\beta} \right) \quad (16)$$

sendo S a sorvidade [$L T^{-1/2}$], r o raio do cilindro [L]; γ igual a 0,75 e β igual a 0,6. Para determinação de K_s e S , o BEST utiliza equações equivalentes às Eqs. 10 e 11, obtidas pela

substituição de K_s em função da sorvidade S e da taxa de infiltração no regime estacionário $q_{+\infty}$, (Eq. 13) nas Eqs. 10 e 11:

$$I(t) = S\sqrt{t} + [a(1-b)S^2 + bq_{+\infty}]t \quad (17)$$

$$q(t) = \frac{2}{2\sqrt{t}} + [a(1-b)S^2 + bq_{+\infty}] \quad (18)$$

O ajuste da Eq. 17 aos dados experimentais da infiltração acumulada $I_{\text{exp}}(t)$ é obtido pela minimização da clássica função objeto, dada por:

$$f_i(S, K_s, k) = \sum_{i=1}^k [I_{\text{exp}}(t_i) - I(t_i)]^2 \quad (19)$$

na qual k é o número considerado de pontos no regime transitório. O algoritmo usado na minimização de $f_i(S, K_s, k)$ é o de Marquardt (1963) e o desempenho dos ajustes é analisado pelos valores correspondentes ao erro quadrático médio (EQM):

$$\text{EQM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [I_{\text{exp}}(t_i) - I(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^k (I_{\text{exp}}(t_i))^2}} \quad (20)$$

Inicialmente, o BEST estima um valor máximo para a sorvidade, S_{MAX} , a partir do ajuste dos dados experimentais com a Eq. 17, caso em que se assume um fluxo de água dependente apenas da capilaridade, considerando-se b igual a zero.

Como as Eqs. 10, 11, 17 e 18 são válidas apenas para o regime transitório, é possível que os ajustes não sejam feitos para todos os valores de k ; a sorvidade é, então, estimada para valores de k de no mínimo cinco pontos para um máximo de N_{tot} . S_{MAX} é considerada o valor máximo de toda a sequência de pontos. Para obter valores positivos de

K_s , levam-se em consideração as seguintes condições: S_{MAX}^2 deve ser menor que a taxa de infiltração no regime estacionário ($q_{+\infty}$) dividido pelo coeficiente a (Eq. 14); assim, a sorvidade máxima S_{MAX} é definida por:

$$S_{MAX} = \text{MAX} \left[\text{MIN} \left(S_{N_{obs}}(b=0), \sqrt{\frac{q_{+\infty}}{a}} \right) \right] \quad (21)$$

Para obtenção de K_s , considera-se o valor verdadeiro de b (Eq. 15). O ajuste é executado minimizando a função objeto definida pela Eq. 19. Como os ajustes pela Eq. 17 nem sempre são válidos para todos os pontos ($0 \dots k$), o BEST ajusta os dados para um mínimo de cinco pontos a um máximo de N_{tot} . Para cada subconjunto de dados que contém os k primeiros pontos, o BEST estima a sorvidade $S(k)$, a condutividade hidráulica $K_s(k)$ em função de $S(k)$ e da Eq. 13 para um tempo máximo $t_{max}(k)$ definido como:

$$t_{max} = \frac{1}{4(1-b)^2} \cdot t_{grav} \quad (22)$$

sendo t_{grav} o tempo gravimétrico definido por Philip (1969). O $t_{max}(k)$ é o tempo máximo para o qual as expressões para o regime transitório são consideradas válidas; logo, o tempo mais longo do subconjunto de dados t_k é comparado com $t_{max}(k)$. Os valores de $S(k)$ e $K_s(k)$ são considerados válidos para t_k menores que $t_{max}(k)$. Dos valores que cumprirem esta condição, serão escolhidos aqueles correspondentes ao maior k . Após a determinação de θ_s e K_s , o parâmetro h_g é obtido pela seguinte equação (LASSABATÈRE et al., 2006):

$$h_g = \frac{S^2}{c_p(\theta_s - \theta_0) \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^n \right] \cdot K_s} \quad (23)$$

na qual c_p é um parâmetro que depende apenas dos parâmetros de formas n , m e η dos modelos (de CONDAPPA et al., 2002; LASSABATÈRE et al., 2006):

$$c_p = \Gamma\left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot \left[\frac{\Gamma\left(n\eta + \frac{1}{n}\right)}{\Gamma(n\eta)} + \frac{\Gamma\left(n\eta + m - \frac{1}{n}\right)}{\Gamma(n\eta + m)} \right] \quad (24)$$

sendo Γ a função gama clássica

2.6. Escalas características

Durante o processo de infiltração tridimensional os fatores que podem afetar o fluxo de entrada de água no solo, são: a geometria da fonte de água, a capilaridade e a gravidade; referidos fatores são caracterizados pelas escalas de comprimento capilar, λ_c [L] (WHITE & SULLY, 1987) e o raio característico de poros hidraulicamente ativos, λ_m [L] (PHILIP, 1987) determinados, respectivamente, pelas equações:

$$\lambda_c = \frac{\delta S^2}{(\theta_s - \theta_0)K_s} \quad (25)$$

$$\lambda_m = \frac{\sigma}{\rho_a g \lambda_c} \quad (26)$$

sendo σ a tensão superficial da água ($0,0719 \text{ N m}^{-1}$), ρ_a a massa específica da água (1000 Kg m^{-3}), g a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$) e δ um parâmetro de forma da difusividade ($1/2 \leq \delta \leq \pi/4$), que foi considerado igual a 0,55 (WHITE & SULLY, 1987).

A escala de comprimento capilar (Eq. 25) representa a importância relativa das forças capilares em relação à gravidade, quando a água é transmitida de uma fonte através do solo, com umidade inicial θ_0 . O raio característico de poros (Eq. 26) define a dimensão média dos poros que participam do processo de infiltração submetida à pressão aplicada h ;

quanto maior for o raio característico, λ_m , maior é o efeito da gravidade em relação ao da capilaridade.

A concentração de raio característico de poros λ_m , $C\lambda_m$ (número de poros m^{-2}), foi estimada usando-se a lei de Poiseuille para fluxo em um tubo capilar, a partir da seguinte expressão:

$$C\lambda_m = \frac{8\mu K}{\rho_a g \pi \lambda_m^4} \quad (27)$$

sendo μ a viscosidade dinâmica da água ($0,00089 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$).

2.7. Análise estatística e geoestatística

Por meio da estatística descritiva determinaram-se medidas de posição: média aritmética e a mediana amostral e as medidas de dispersão, variância, desvio-padrão amostral e coeficiente de variação.

As propriedades hidrodinâmicas foram analisada a estrutura espacial, pela análise geoestatística através dos semivariogramas experimentais (BERG et al., 1997), onde a dependência espacial é definida pelo alcance (A) e do erro comedido devido à distância de amostragens, definido pelo efeito pepita (C_0). A dependência espacial entre as observações é expressa através do semivariograma, estimado pela seguinte expressão:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (28)$$

sendo que: $\gamma(h)$ representa o valor do semivariância estimado para a distância de separação (h) entre as medidas, $Z(x_i)$ representa o valor da variável para posição x_i não estimado (verdadeiro), $Z(x_i+h)$ representa o valor da mesma variável na posição x_i+h em qualquer

direção, h é a distância de separação entre as medidas e $N(h)$ representa o número de pares experimentais de dados medidos de $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$.

Alguns modelos matemáticos foram ajustados aos semivariogramas, os quais permitem visualizar a natureza da variação espacial dos atributos físico-hídricos do solo em campo, além de serem necessários para outras aplicações, como, por exemplo, krigagem. Os seguintes modelos matemáticos mais usados podem ser ajustados aos semivariogramas:

a) Modelo esférico:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{A} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{A} \right)^3 \right], 0 < h < A \quad (29)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1, h \geq A_0 \quad (30)$$

b) Modelo exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3 \frac{h}{A}\right) \right], 0 < h < d \quad (31)$$

em que d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido;

c) Modelo gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3 \frac{h}{A}\right)^2 \right], 0 < h < d \quad (32)$$

Ajustar modelos matemáticos aos semivariogramas é um procedimento subjetivo, que requer do pesquisador certa experiência, para se obter um bom ajuste. Sendo que a qualidade de ajuste pode ser verificada por meio da técnica da validação cruzada pelo

método de Jack-Knifing (VAUCLIN et al.,1983). O método consiste em remover sucessivamente um dado do ponto Z_i de cada vez e depois estimá-lo a partir do restante de pontos, produzindo um valor de Z_i^* . Dessa forma, em cada localização dos pontos X_i , define-se um erro reduzido R_i , seu valor médio e sua variância. O erro reduzido médio deve ser próximo de zero, caso não exista erro sistemático, e a variância deve ser próxima de um, sugerindo que a variância dos erros $(Z_i - Z_i^*)$ está consistente com a variância da krigagem $(\sigma_{KR})^2$.

Para a os atributos físico-hídricos do solo com dependência espacial, espera-se que o semivariograma comece com um baixo valor, denominado efeito pepita (C_0) e seja crescente com a distância, até um valor denominado alcance (A), que corresponde ao limite da dependência espacial e também define o raio máximo para interpolação por krigagem. A partir do alcance, a variável apresenta-se espacialmente independente e a semivariância tende a se estabilizar em torno de um valor denominado de patamar (C_0+C_1), em que C_1 é variância espacial ou estrutural. A decisão pelo melhor modelo e respectivos coeficientes foi tomada com base no teste Jack-Knifing.

Para analisar o grau da dependência espacial dos atributos, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm um efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar, moderada quando está entre 25 e 75% e fraca quando for maior que 75%.

Existindo a dependência ou correlação espacial, as estimativas para pontos não observados são obtidas pela técnica da krigagem. Esta é uma técnica de interpolação não tendenciosa que possui variância mínima, cuja estimativa é obtida através do cálculo de uma média ponderada de um conjunto de observações ao redor de uma vizinhança (ANDRADE, 2004). Neste caso, a estimativa de $\bar{Z}(x_0)$ associado à posição x_0 , pode ser obtido pela expressão:

$$\bar{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (33)$$

sendo, $\bar{Z}(x_0)$ os valores estimados da variável em estudo, x_0 o ponto a ser estimado, N o número de vizinhos utilizado na estimativa $\bar{Z}(x_0)$, λ_i os pesos ponderados associados a cada valor medido de $\bar{Z}(x_0)$.

Finalmente, por meio da técnica de interpolação da Krigagem, foram construídos os mapas de isolinhas de superfície representativo da distribuição espacial dos atributos hidrodinâmicos do solo, com o auxílio do programa Surfer versão 10.1 (GOLDEN SOFTWARE, 2011).

Após a verificação da ausência de correlação a curta distância pelos semivariogramas das variáveis consideradas neste trabalho, a heterogeneidade espacial das variáveis foram caracterizada pela estatística clássica, considerando que as observações são estatisticamente independentes umas das outras. E, neste caso, os mapas de isolinhas bidimensionais das variáveis estudadas foram construídos por interpolação utilizando o método *Função de Base Radial* (FBR).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Comportamento das componentes texturais e de infiltração em solo sob pastagem e sob caatinga

As curvas granulométricas da camada superficial (0 a 10 cm) são apresentadas na Figura 5. No geral, foi observada menor dispersão entre os pontos das curvas granulométricas do solo da área sob pastagem em relação aos da área mais preservada, sob caatinga, isso se deve ao fato que no solo sob caatinga foi observado um maior percentual de classe textural areia franca.

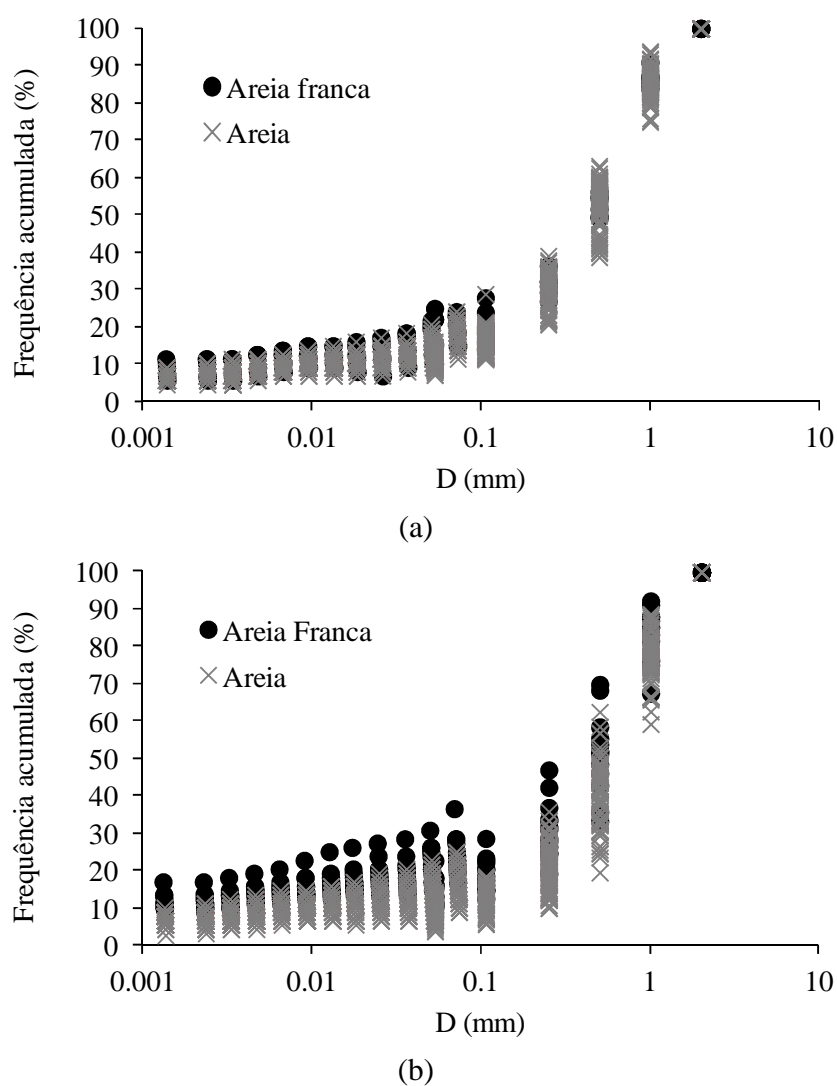


Figura 5. Curvas granulométricas em solo sob pastagem (a) e sob caatinga (b)

A baixa dispersão dos teores da areia, silte e argila também podem ser observadas por meio do triângulo textural (Figura 6). Observou-se para área com pastagem que 94,22% dos pontos amostrados foram classificados como areia e 5,78%, como areia franca. Já para área com vegetação nativa (caatinga), 87,50% dos pontos foram classificados como areia e 12,50% como areia franca.

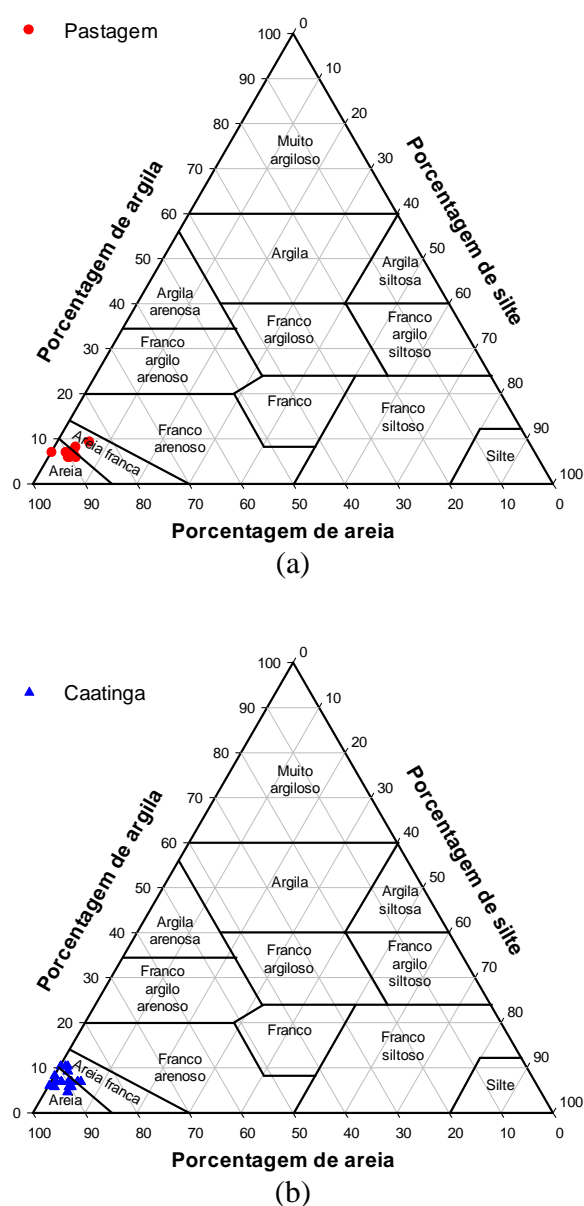


Figura 6. Classes textuais de um Neossolo Regolítico sob pastagem (a), e sob caatinga (b).

Os parâmetros estatísticos da textura são apresentados na Tabela 1. Os valores médios obtidos para areia, silte e argila foram respectivamente 88,11; 5,07 e 6,82 dag kg⁻¹ para a área com pastagem e 89,58; 2,62 e 7,80 dag kg⁻¹ para área com caatinga.

Segundo os limites de coeficiente de variação (CV), proposto por Warrick e Nielsen (1980), concluiu-se que os percentuais de areia tiveram baixa variabilidade para as duas áreas analisadas, os percentuais de silte tiveram média e alta variabilidade para as áreas com pastagem e caatinga respectivamente, e os percentuais de argila se enquadram como de média variabilidade. Silva et al. (2010) estudando a variabilidade espacial dos atributos físico-químico em Neossolo Flúvico no Agreste de Pernambuco verificaram que as frações granulométricas areia, silte e argila apresentaram média variabilidade. A mesma tendência também foi encontrada por Vieira et al. (2007), para as frações areia, silte e argila, para solos franco-argilo-arenosos cultivados com pastagem de capim braquiária e grama batatais. Já Souza et al. (2004) identificaram baixa variabilidade para argila, média variabilidade para silte e areia, em Latossolos cultivados com cana-de-açúcar.

Também foi verificado que para as três frações analisadas os valores de CV são maiores na área de caatinga que na área com pastagem. Segundo Lima et al. (2004), o sistema de pastejo e manejo do solo homogeneiza seus atributos diminuindo a sua variabilidade, uma vez que na preparação do pasto o solo é arado, gradeado e, na maiorias das vezes, apenas uma espécie de capim é utilizada.

Tabela 1. Estatística das frações granulométricas

Parâmetros estatísticos	Pastagem			Caatinga		
	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila
	-----dag kg ⁻¹ -----			-----dag kg ⁻¹ -----		
Média (μ)	88,11	5,07	6,82	89,58	2,62	7,80
Mediana (Med)	88,31	4,79	6,90	89,76	2,49	8,05
Desvio - Padrão (σ)	2,52	2,47	1,03	3,03	1,67	2,08
Variância (σ^2)	6,36	6,08	1,05	9,20	2,81	4,33
Coef. de Variação (CV%)	2,86	49,66	15,03	3,39	63,92	26,67
Assimetria (Cs)	-2,13	2,44	1,42	-0,99	0,11	1,40
Valor Máximo ($V_{\text{máx}}$)	92,86	18,10	11,50	95,04	6,19	17,25
Valor Mínimo ($V_{\text{mín}}$)	75,00	0,24	4,60	77,07	0,02	2,99
Número de observações (N)	121	121	121	104	104	104
Kolmogorov - Smirnov	0,11*	0,13**	0,31	0,08*	0,07*	0,19

*Distribuição Normal a 95% de probabilidade **Distribuição Normal a 99% de probabilidade

De acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov, foi verificado que os percentuais de areia seguem uma distribuição normal a 95% de confiança para ambas as áreas. Da mesma forma, os percentuais de silte seguem tem uma distribuição normal a 99% e 95% de confiança para pastagem e caatinga respectivamente. Já para os percentuais de argila não foi verificada a normalidade da distribuição dos dados. Tais resultados não são corroborados por Silva et al. (2010) e Souza (2005) que encontraram a distribuição normal para essas frações granulométricas.

Em relação à análise espacial dos dados granulométricos, os resultados mostraram que as frações areia e silte da área com pastagem não apresentaram estrutura de dependência espacial, sendo considerada puramente aleatória. Por outro lado, na distribuição da fração argila foi identificada dependência (Figura 7). Segundo Bottega et al. (2013), a argila, dentre os atributos que compõem a textura do solo, é o que apresenta menor variabilidade e maior continuidade espacial, garantindo melhor precisão nas estimativas em locais não amostrados.

Para a área com caatinga, todas as componentes texturais apresentaram dependência espacial, isso significa que para essa área os pontos amostrais das componentes texturais estão relacionados uns aos outros no espaço.

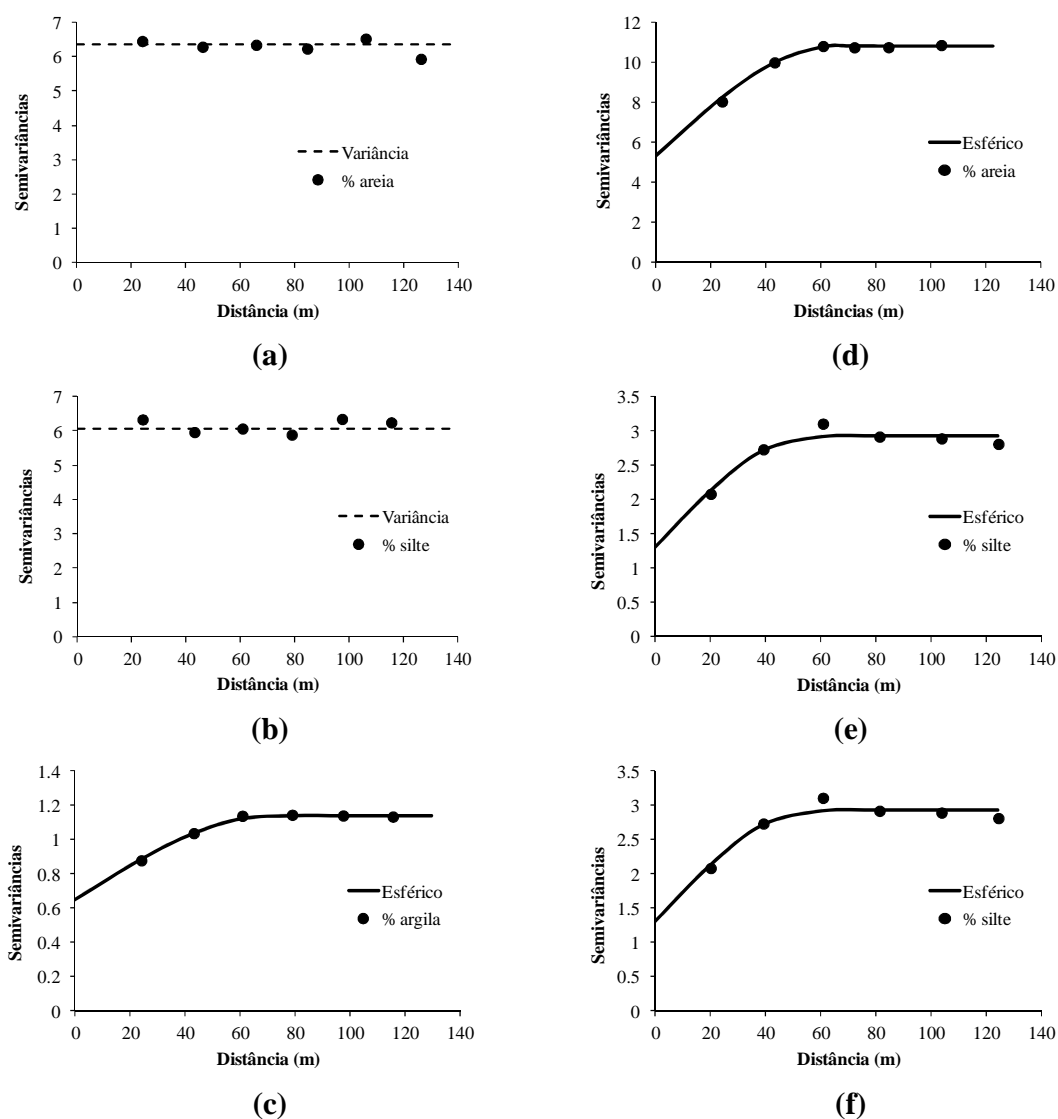


Figura 7. Semivariogramas experimentais e teóricos da % de areia, silte e argila do solo sob pastagem (a, b e c) e sob caatinga (d, e e f)

O modelo teórico que melhor se ajustou para as componentes texturais das duas áreas foi o esférico (Figura 7). Segundo Bertol et al. (2000) e Souza et al. (2004), os modelos que mais se ajustam aos dados de atributos físicos do solo são o esférico e

exponencial. De acordo com os critérios propostos por Cambardella et al. (1994), a argila no solo sob pastagem apresentou o valor índice de dependência espacial de 56,14%. Os componentes texturais areia, silte e argila da área com caatinga apresentaram respectivamente os valores de 49,07%, 44,36% e 57,57% para o mesmo índice. Todos esses valores são considerados como moderada dependência espacial.

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros geoestatísticos dos componentes texturais. Os valores para o alcance (A) da argila do solo sob pastagem foi 72 m, similar ao valor encontrado para argila do solo sob caatinga, a qual apresentou um alcance de 80 m, cerca de 10% maior em relação ao solo sob pastagem. Os alcances para areia e silte do solo sob caatinga foram respectivamente 65 e 57 m. Souza (2005) encontrou valores de alcance de 140, 150 e 156 m para argila, silte e areia, respectivamente, em Neossolo Flúvico e valores de 112, 129,6 e 112 m para argila, silte e areia, respectivamente para Latossolo Amarelo no Estado da Paraíba. Segundo este autor os alcances maiores no Neossolo Flúvico indicam uma maior continuidade na distribuição espacial comparado ao Latossolo Amarelo.

Tabela 2. Geoestatística dos componentes texturais

Propriedades	Modelo	C ₀	C ₁	A (m)	R ²	Teste Jack-Knifing	
						μ _{Ri}	σ _{Ri}
Pastagem							
Areia (dag Kg ⁻¹)	*	-	-	-	-	-	-
Silte (dag Kg ⁻¹)	*	-	-	-	-	-	-
Argila (dag Kg ⁻¹)	Esférico	0,65	0,49	72	0,995	-0,0005	0,7638
Caatinga							
Areia (dag Kg ⁻¹)	Esférico	5,30	5,50	65	0,997	-0,0029	0,6754
Silte (dag Kg ⁻¹)	Esférico	1,30	1,63	57	0,924	0,0153	0,8250
Argila (dag Kg ⁻¹)	Esférico	2,85	2,10	80	0,975	-0,0041	0,6763

C₀ é o efeito pepita; C₁ é a dispersão da variância; A é o alcance e R² é o coeficiente de determinação.

*Puramente aleatório. μ_{Ri} e σ_{Ri} são a média e a variância do erro reduzido R_i obtidos pela técnica da validação cruzada.

Os valores dos coeficientes de determinação R^2 foram próximos a um. Os semivariogramas ajustados foram validados através do método de Jack-knifing (VAUCLIN et al., 1983), produzindo resíduos com médias entre -0,0005 e 0,0153 e variância entre 0,675 e 0,825, que determina um bom ajuste dos semivariogramas (Figura 7).

Na Figura 8 é apresentado o comportamento espacial das componentes texturais através dos mapas de isolinhas, construídos a partir dos parâmetros dos semivariogramas escalonados (Figura7). Verifica-se que os mapas do solo sob pastagem têm valores com amplitude de 75 a 92 dag kg⁻¹ de areia, 0,2 a 18 dag kg⁻¹ de silte e 4,5 a 11 dag kg⁻¹ de argila. Enquanto que no solo sob caatinga os mapas possuem valores variando de 77 a 95 dag kg⁻¹ de areia, 0,2 a 6 dag kg⁻¹ de silte e 3 a 17 dag kg⁻¹ da fração de argila. Fazendo-se uma análise visual, pode-se afirmar que os mapas das componentes texturais areia e silte do solo com pastagem são aleatórios. Para a componente argila, nota-se que os maiores conteúdos encontram-se no centro-esquerdo do mapa, local que o relevo sofre pequena depressão sendo este um provável local de acúmulo de argila.

Na análise do mapa do solo sob caatinga nota-se pouca variação da componente areia com pequeno gradiente do centro à margem esquerda do mapa. Para a componente silte é observado menores valores em faixa horizontal no centro do mapa, a componente argila apresenta maiores percentuais no quadrante superior direito. De acordo com Souza et al. (2004), as frações do solo geralmente apresentam comportamento inverso, principalmente na distribuição, pois como são medidos em porcentagem quando há acréscimo de um ocorre redução de outro.

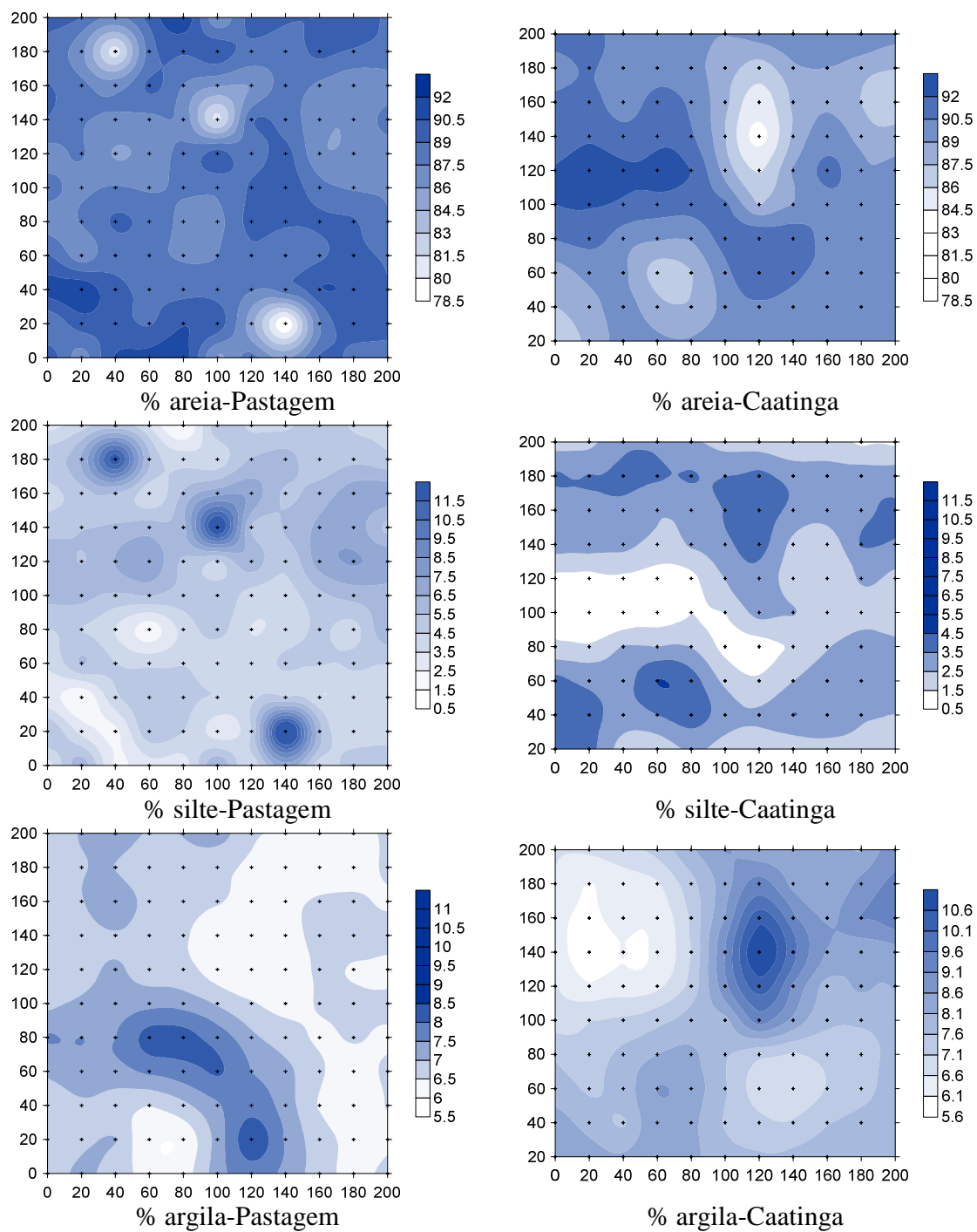


Figura 8. Mapa de isolinhas para as percentagens de areia, silte e argila em solo sob pastagem e sob caatinga

A estatística dos parâmetros da curva granulométrica ($F(D)$) é apresentada na Tabela 3. Os valores médios dos parâmetros de forma N e M e o parâmetro de escala das partículas D_g (mm) (Equação 3) foram respectivamente 2,61, 0,23 e 1,24 para o solo sob pastagem e 2,58, 0,22 e 1,61 para o solo sob caatinga. Foi verificada que os valores dos parâmetros N e M para as duas áreas são praticamente iguais, já parâmetro de escala D_g foi significativamente maior para área com caatinga. Segundo Souza et al. (2007) os parâmetros de forma M e N da curvas de distribuição das partículas são maiores para os solos de frações mais grosserias, enquanto os parâmetros de escala do diâmetro das partículas D_g são menores para frações mais arenosas. Isto foi confirmado no presente estudo uma vez que o solo da caatinga possui um diâmetro menor de areia que solo da pastagem (Figura 5).

Tabela 3. Estatística dos parâmetros da curva granulométrica ($F(D)$)

Parâmetros estatísticos	Pastagem			Caatinga		
	N	M	D_g (mm)	N	M	D_g (mm)
Média (μ)	2,61	0,23	1,24	2,58	0,22	1,61
Mediana (Med)	2,60	0,23	1,23	2,57	0,22	1,58
Desvio - Padrão(σ)	0,07	0,02	0,12	0,11	0,03	0,30
Variância (σ^2)	0,005	0,0004	0,001	0,01	0,001	0,09
Coef. de Variação (CV%)	2,68	8,69	9,67	4,26	13,63	18,63
Assimetria (Cs)	1,26	1,26	0,59	0,74	0,47	0,61
Valor Máximo ($V_{\text{máx}}$)	2,88	0,31	1,63	2,90	0,31	2,60
Valor Mínimo ($V_{\text{mín}}$)	2,45	0,19	1,02	2,35	0,15	0,97
Número de observações (N)	107	107	107	66	66	66
Kolmogorov - Smirnov	0,113*	0,102*	0,074*	0,082*	0,073*	0,071*

*Distribuição Normal a 95% de probabilidade

Os parâmetros da curva granulométrica, N e D_g nas duas áreas, foram ajustados com uma função de distribuição normal (Tabela 3) a 95% de probabilidade. Os valores de CV permitem classificar esses resultados como de baixa variabilidade, conforme Warrick & Nielsen (1980). Exceção foram os parâmetros M e D_g para área com caatinga que apresentaram média variabilidade, com CV de 13,63 e 18,63% respectivamente.

Os resultados da análise geoestatística (Figura 9 e Tabela 4) demonstram que os parâmetros de $F(D)$ apresentaram dependência espacial moderada, com valores entre 26,59 e 54,54 %, de acordo com Cambardella et al. (1994). O modelo que melhor se ajustou foi o esférico. Os valores do alcance para os parâmetros da $F(D)$ foram 220 m para N e M e 140 m para D_g do solo sob pastagem. Para o solo sob caatinga os valores de N , M e D_g foram respectivamente 70, 80 e 100 m (Tabela 4). Esses valores foram significativamente menores que na área com pastagem (Figura 9).

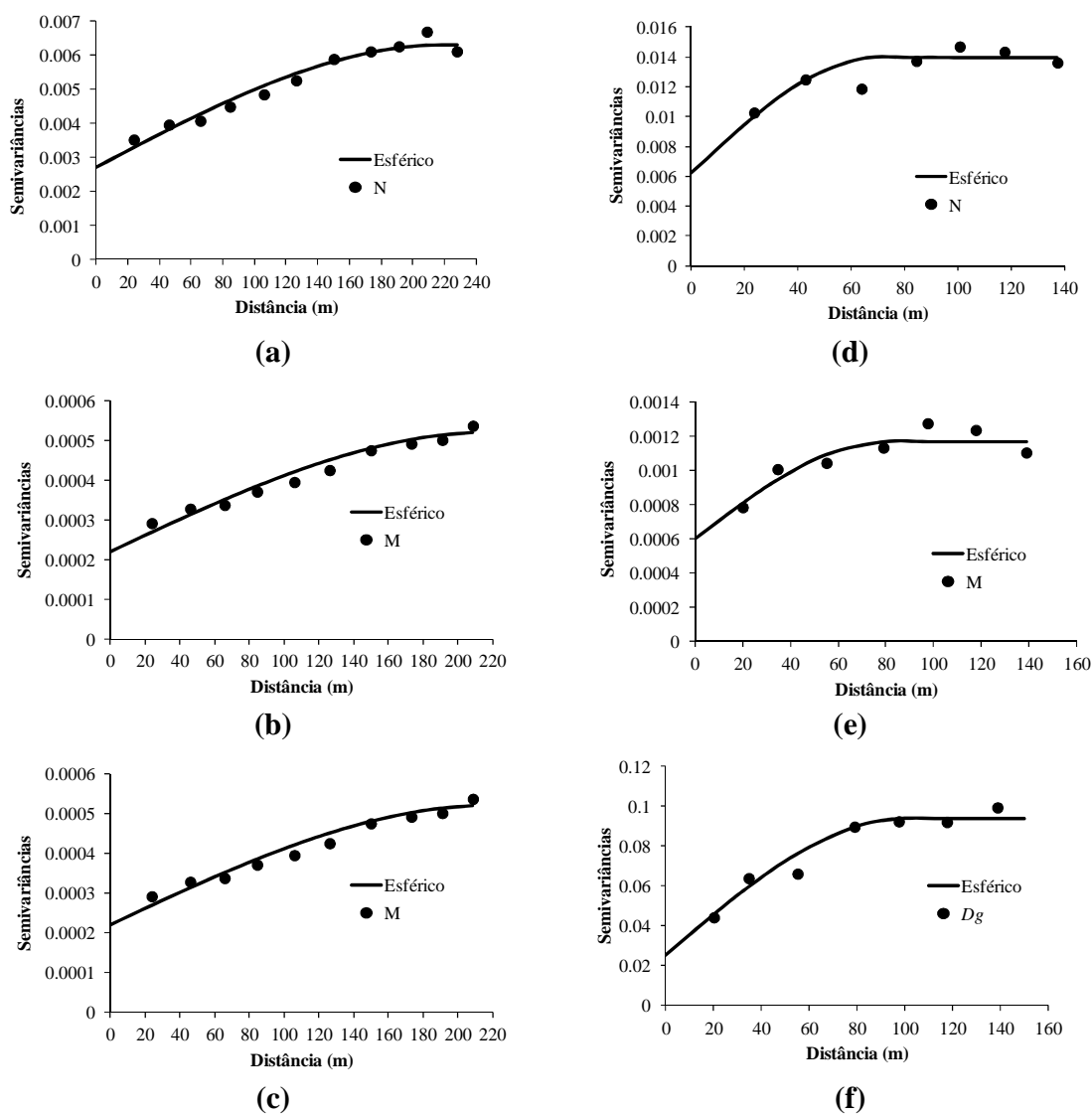


Figura 9. Semivariogramas experimental e teórico dos parâmetros da $F(D)$ do solo sob pastagem (a, b e c), e sob caatinga (d, e e f)

Tabela 4. Geoestatística dos parâmetros da curva granulométrica do solo sob pastagem e solo sob caatinga

Propriedades	Modelo	C ₀	C ₁	A (m)	R ²	Teste Jack-Knifing	
						μ _{Ri}	σ _{Ri}
Pastagem							
N	Esférico	0,0027	0,0036	220	0,961	-0,0074	1,1287
M	Esférico	0,0002	0,0003	220	0,962	-0,0079	1,2620
D _g	Esférico	0,0084	0,0083	140	0,864	-0,0142	1,1501
Caatinga							
N	Esférico	0,0062	0,0078	70	0,691	0,0104	0,8329
M	Esférico	0,0006	0,0005	80	0,828	0,0105	0,8383
D _g	Esférico	0,0250	0,0690	100	0,945	-0,0015	0,8712

C₀ é o efeito pepita; C₁ é a dispersão da variância; A é o alcance e R² é o coeficiente de determinação. μ_{Ri} e σ_{Ri} são a média e a variância do erro reduzido R_i obtidos pela técnica da validação cruzada.

As curvas de infiltração acumulada (Figura 10) estão agrupadas de acordo com a classe textural do solo. Segundo Souza et al. (2008), as comparações das lâminas de água medidas, nas diferentes classes texturais, demonstram que existem diferenças qualitativas dos efeitos texturais e estruturais no fluxo de água.

A duração dos ensaios de infiltração na pastagem variou de 500 a 2000 s (média de 1375 s). Já a variação da lâmina acumulada foi de 85 a 120 mm (média de 91 mm). No solo sob caatinga, a maior parte dos ensaios teve duração entre 200 e 1200 s (média de 1088 s) e a lâmina acumulada variou entre 90 e 120 mm (média de 98 mm). Esses valores demonstram um aumento expressivo no tempo médio da duração da infiltração acumulada do solo sob pastagem, cerca de 30% maior em relação ao solo com caatinga.

Zwirtes et al. (2011), avaliando algumas propriedades físico-hídrica de Latossolo vermelho de textura argilosa submetidos a diferentes manejos, concluíram que houve variação significativa entre os valores de velocidade de infiltração, sendo maiores na área Mata Nativa em comparação com as demais áreas.

Miguel et al. (2009) avaliando a infiltração de água em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico típico, de textura entre arenosa e média e cultivada com pastagem de *Brachiaria brizantha*, observaram redução na capacidade de infiltração de água no solo

após a 1ª, 10ª e 15ª passada do gado no piquete, com valores de 215,4; 81,81 e 57,5 mm h⁻¹ respectivamente. Os autores atribuíram que esta diferença deve-se a possível formação de camadas compactadas ocasionadas pelas passagens do gado. Segundo Carvalho & Silva (2006), os solos cultivados com pastagem sofrem intensa compactação pelos cascos dos animais.

Pela Figura 10 também é possível observar maior variabilidade dos fluxos de infiltração dos pontos localizados na área com pastagem, em relação à área com caatinga. Segundo Souza (2005), onde os dados texturais são mais variáveis, é observada a dispersão na infiltração. O autor relata também que as infiltrações podem ser sobrepostas à distribuição da textura e da estrutura do solo. O mesmo autor justifica que esse efeito pode estar associado com a ativação hidráulica dos macroporos, durante a infiltração com pressão zero.

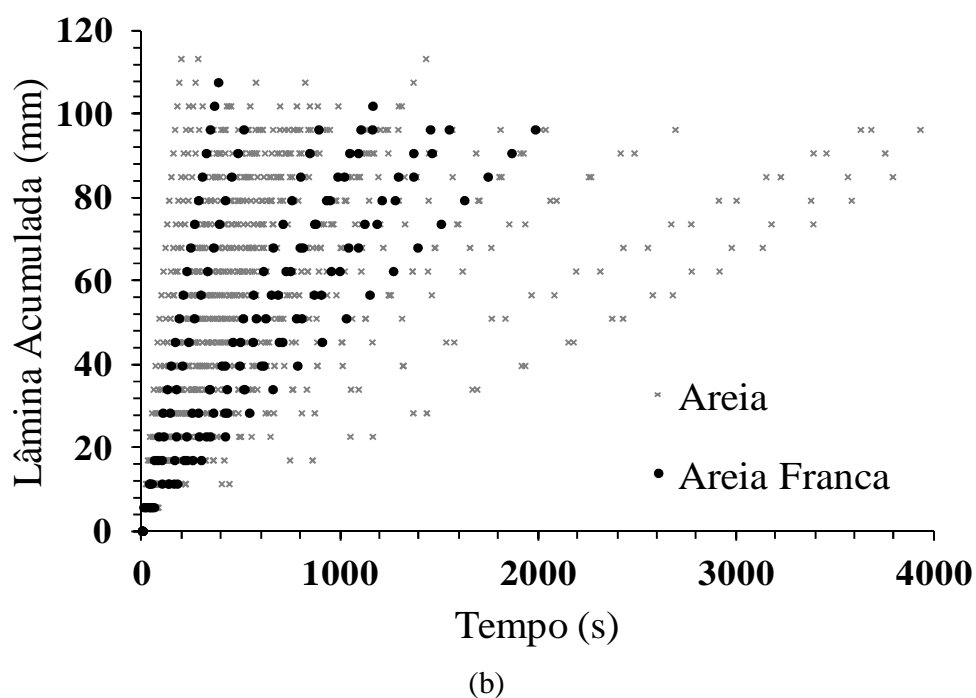
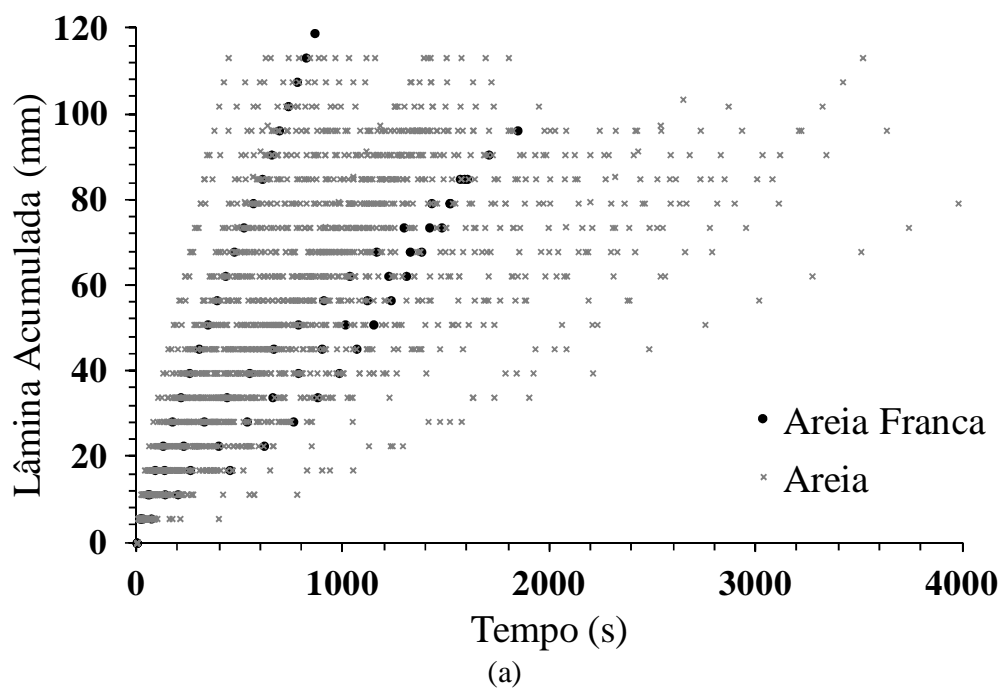


Figura 10. Curvas de infiltração acumulada em função do tempo no solo sob pastagem (a) e sob catinga (b)

3.2. Comportamento das propriedades dos solos das áreas de pastagem e de caatinga

3.2.1. Propriedades físico-hídricas (ρ_s , θ_0 e θ_s)

A análise estatística das propriedades físico-hídricas, quais sejam: densidade do solo (ρ_s), umidade inicial (θ_0) e umidade final (θ_s) são apresentadas na Tabela 5. Não foram observados diferenças expressivas entre os valores médios de θ_0 e de θ_s para as áreas com pastagem e com caatinga. Já para valor de ρ_s foi observado pequena diferença, porém essas diferenças são significativas a 99% segundo o teste F (Tabela A 13). Nota-se, também, maior amplitude nos valores de ρ_s para o solo com caatinga que para o solo com pastagem.

Mesmo com o incremento na ρ_s , salienta-se que os valores observados no solo com pastagem não são considerados críticos ao desenvolvimento radicular das plantas, que estaria em torno de $1,75 \text{ kg dm}^{-3}$ para solos arenosos (CORSINI & FERRAUDO, 1999).

O incremento na ρ_s devido à interferência antrópica tem sido relatado por vários autores como o resultado do tráfego de máquinas e implementos agrícolas e do pisoteio de animais, menor teor de matéria orgânica, em sistemas de pastagem (ARAÚJO et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2007; SEVERIANO et al., 2008; SALES et al., 2010). Entretanto, vale ressaltar que, quando a carga animal, o manejo e o tráfego de máquinas são controlados e realizados de forma adequada, as alterações nos atributos físicos são pequenas e não causam qualquer dano à cultura submetida ao pastejo (SILVA et al., 2000; ALBUQUERQUE et al., 2001; CASSOL, 2003.; OLIVEIRA et al., 2007). Além disso, o aumento na ρ_s , como consequência da compactação, não deve ser considerado permanente, uma vez que após a morte e decomposição do sistema radicular serão formados bioporos, conduzindo ao aumento da aeração e da infiltração de água no solo (STONE & SILVEIRA 2001).

De acordo com critérios estabelecidos por Warrick & Nielsen (1980), as propriedades ρ_s , θ_s e θ_0 são considerados respectivamente como de baixa, média e alta variabilidade para os duas áreas analisadas. O teste Kolmogorov - Smirnov mostra que as propriedades ρ_s e θ_s , para o solo sob pastagem, e θ_s para o solo sob caatinga, têm

distribuição normal a 95% de probabilidade, enquanto que para as propriedades θ_0 do solo sob pastagem e para ρ_s e θ_0 do solo sob caatinga a distribuição não foi normal.

Tabela 5. Estatística das propriedades físico-hídricas dos solos sob pastagem e sob caatinga

Parâmetros estatísticos	Pastagem			Caatinga		
	ρ_s (kg dm ⁻³)	θ_0 (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	ρ_s (kg dm ⁻³)	θ_0 (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)
Média (μ)	1,39	0,009	0,331	1,31	0,007	0,336
Mediana (Med)	1,39	0,003	0,330	1,29	0,005	0,330
Desvio – Padrão (σ)	0,05	0,016	0,060	0,119	0,005	0,094
Variância (σ^2)	0,002	0,000	0,004	0,001	0,000	0,009
Coef. de Variação (CV%)	3,60	177,77	18,12	9,03	71,42	27,97
Assimetria (Cs)	0,49	4,857	0,287	1,536	4,178	1,087
Valor Máximo ($V_{m\acute{a}x}$)	1,56	0,130	0,580	1,67	0,040	0,660
Valor Mínimo ($V_{m\acute{i}n}$)	1,29	0,001	0,120	1,16	0,001	0,200
Número de observações (N)	107	107	107	66	66	66
Kolmogorov - Smirnov	0,073*	0,341	0,072*	0,204	0,206	0,086*

*Distribuição Normal a 95% de probabilidade

Os semivariogramas experimentais normalizados correspondentes as propriedades físico-hídricas (ρ_s , θ_0 e θ_s) para os solos sob pastagem e sob caatinga são apresentados na Figura 11. Nota-se que as propriedades ρ_s e θ_s para o solo sob pastagem não apresentaram estrutura de dependência espacial sendo consideradas totalmente aleatórias ou efeito pepita puro.

O efeito pepita puro indica que a distribuição espacial do atributo na área de estudo é homogênea, aleatória ou a malha amostral utilizada não possui pontos suficientes para detectar a dependência que, se existir, será manifestada à distâncias menores que o menor espaçamento entre amostras (GUIMARÃES, 2004).

A propriedade θ_0 do solo sob pastagem e as propriedades ρ_s , θ_0 e θ_s do solo sob caatinga apresentaram dependência espacial, sendo o modelo esférico ajustado às propriedades (Figura 11).

Os procedimento de validação dos modelos de semivariograma esféricos foi realizado a partir do teste Jack-Knifing (VAUCLIN et al., 1983) para ρ_s , θ_0 e θ_s nas duas áreas. Todos os semivariogramas tiveram bons ajustes, com exceção do semivariograma da θ_s da área de caatinga que obteve média de -0,0054 e variância 0,606 (Tabela 6).

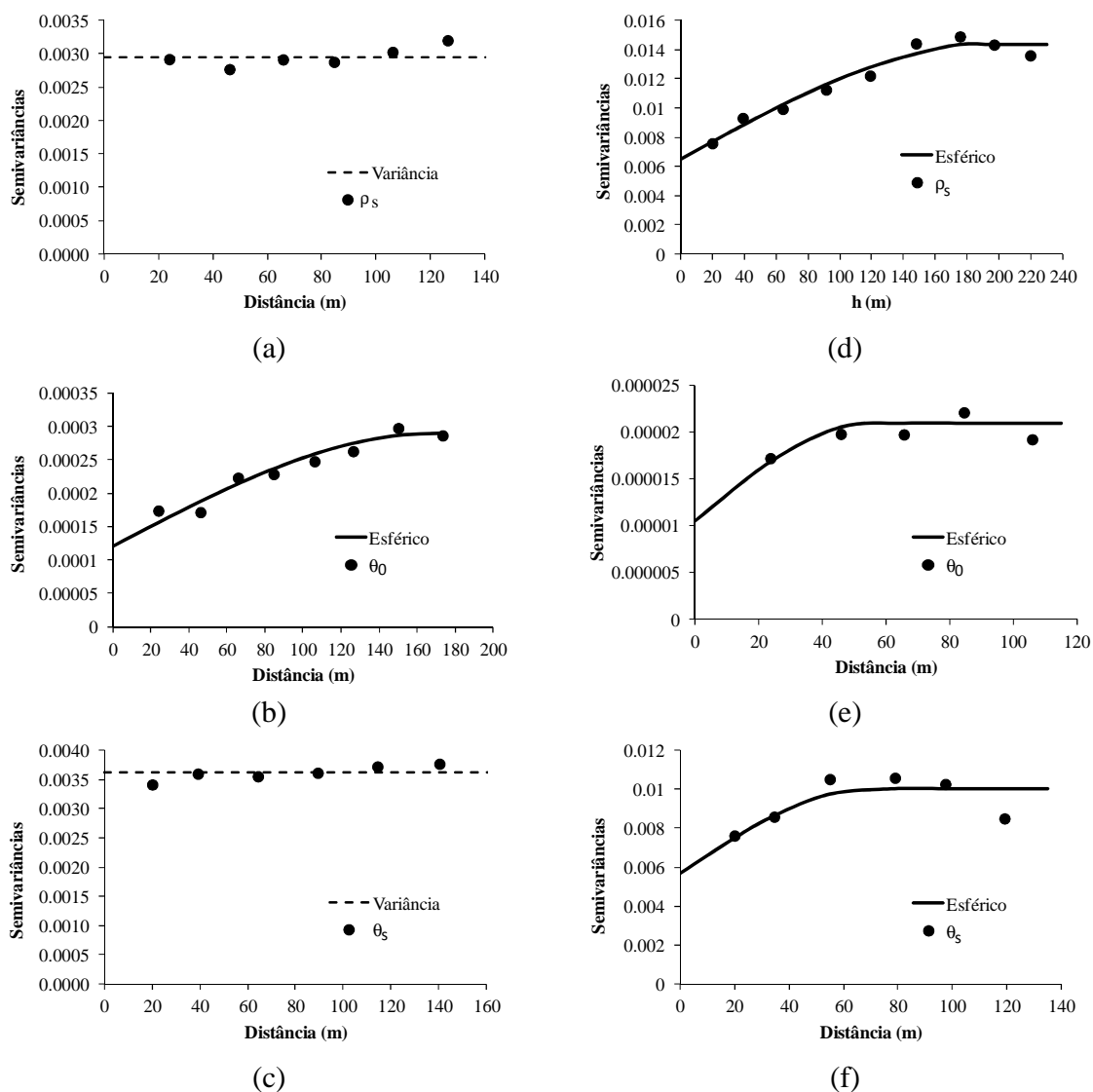


Figura 11. Semivariogramas experimental e teórico das propriedades físico-hídricas, ρ_s , θ_0 e θ_s do solo sob pastagem (a, b e c), e sob caatinga (d, e e f)

De acordo com o critério estabelecido por Cambardella et al. (1994), todas as propriedades que apresentaram dependência espacial são consideradas moderadas. Os valores para o alcance obtidos foram 170 m para a θ_0 do solo sob pastagem e 195, 55 e 70

m, respectivamente, para ρ_s , θ_0 e θ_s do solo sob caatinga (Tabela 6). Nota-se uma diferença muito grande entre os alcances da θ_0 para as duas áreas estudadas, cerca de 3 vezes maior para o solo sob pastagem. Isso se deve à incidência de precipitação no momento dos primeiros ensaios de infiltração realizado na área com pastagem. O que gerou uma dependência espacial devido ao gradiente de umidade dos pontos amostrados no início e no final da campanha de infiltração na área de pastagem. Já nos dias que foram realizados os ensaios de infiltração e coletadas as θ_0 do solo sob caatinga não ocorreram precipitações.

Tabela 6. Geoestatística das propriedades físico-hídricas do solo sob pastagem e sob caatinga

Propriedades	Modelo	C_0	C_1	A (m)	R^2	Teste Jack-Knifing	
						μ_{R_i}	σ_{R_i}
Pastagem							
ρ_s (g cm ⁻³)	*	-	-	-	-		
θ_0 (cm ³ cm ⁻³)	Esférico	0,00012	0,00017	170	0,935	-0,005	1,175
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	*	-	-	-	-		
Caatinga							
ρ_s (g cm ⁻³)	Esférico	0,0065	0,0078	195	0,970	-0,0244	1,141
θ_0 (cm ³ cm ⁻³)	Esférico	0,0000105	0,0000105	55	0,610	-0,0144	1,150
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	Esférico	0,0057	0,0043	70	0,590	-0,0054	0,607

C_0 é o efeito pepita; C_1 é a dispersão da variância; A é o alcance e R^2 é o coeficiente de determinação. μ_{R_i} e σ_{R_i} são a média e a variância do erro reduzido R_i obtidos pela técnica da validação cruzada.

Na Figura 12 é apresentado o mapa de isolinha para as propriedades físico-hídricas ρ_s , θ_0 e θ_s para as duas áreas em estudo. Ao se analisar a distribuição espacial da ρ_s entre as duas áreas nota-se um comportamento bastante diferente. De forma geral, observa-se certa aleatoriedade no solo sob pastagem, com concentração dos maiores valores na parte central do mapa. Esse efeito provavelmente está relacionado ao hábito específico dos animais pastarem nessa área.

Já no solo sob caatinga, nota-se que os maiores valores de ρ_s encontram-se nas bordas da área estudada. Essa distribuição espacial deve-se ao fato dessa região ter maior probabilidade de sofrer interferência antrópica, como se pode observar pela presença de via

de carro entre a pastagem e a caatinga (Figura 1b). Outra questão é a possibilidade dos animais entrarem na vegetação em busca de sombra nos dias mais quentes.

Pela análise estatística a variável ρ_s difere significativamente entre o solo sob pastagem e o solo sob caatinga (Tabela 5), corroborando ao se inferir a geoestatística dessa propriedade é evidenciada grande diferença entre as áreas. Isso ressalta a importância que no planejamento agrícola e nas avaliações das propriedades hidrodinâmicas não se deve fazer inferências apenas utilizando-se valores médios.

A umidade inicial para as duas áreas é praticamente constante, com uma pequena variação no mapa da θ_0 do solo sob pastagem que em sua margem superior apresenta um aumento nos seus valores. Isso se deve ao fato de no dia em que foi realizado as coletas nesses pontos havia chovido e o solo encontrava-se mais úmido.

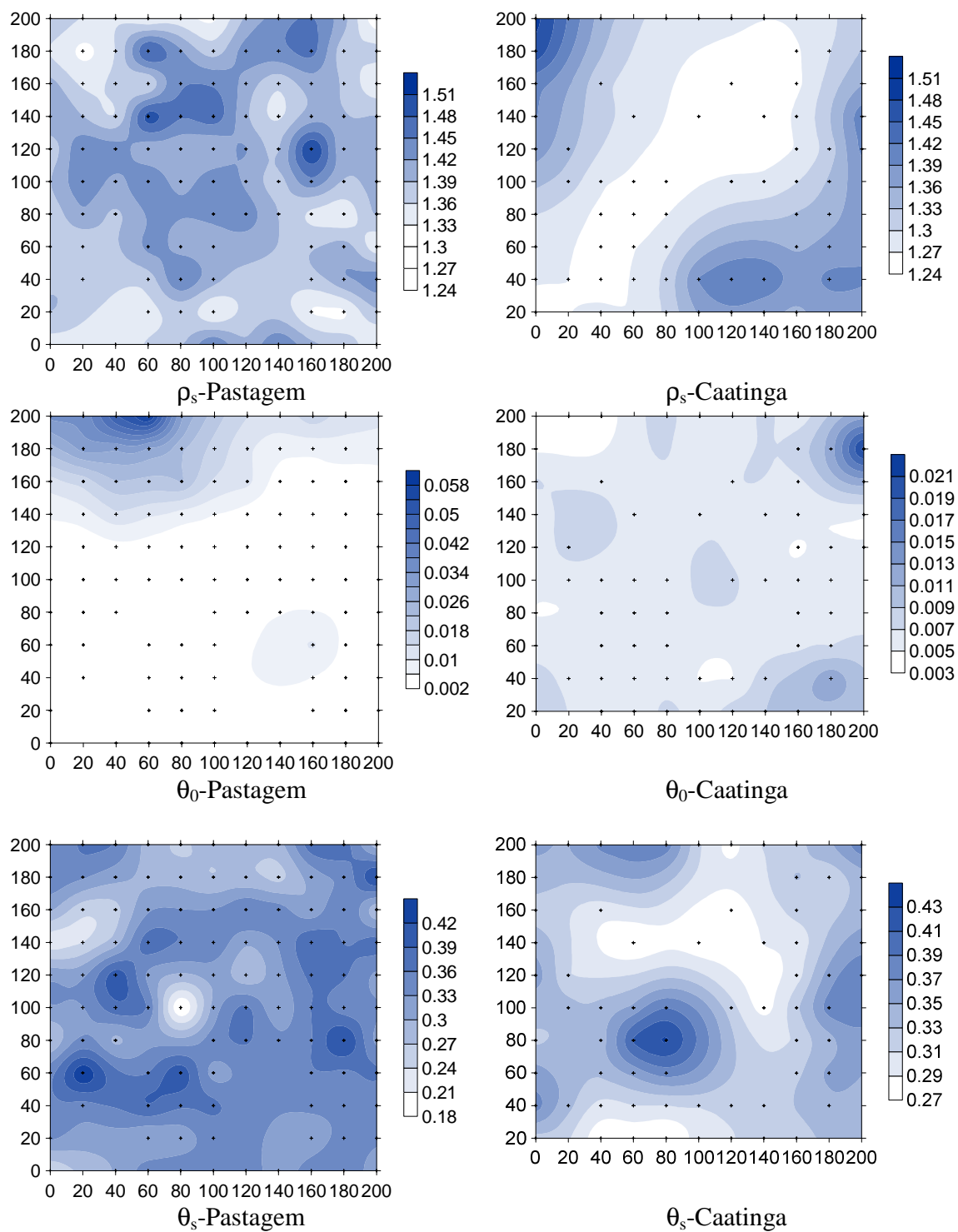


Figura 12. Mapa de isolinhas para as propriedades físico-hídricas, ρ_s , θ_0 e θ_s do solo sob pastagem e sob caatinga

3.2.2. Parâmetros de forma das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ (m , n e η)

A estatística dos parâmetros m , n e η da curva de retenção da água no solo do solo ($\theta(h)$) e curva da condutividade hidráulica do solo ($K(\theta)$) (equações 1 e 2) são apresentados na Tabela 7. Os valores médios para m , n e η foram respectivamente 0,128; 2,296 e 9,822 para o solo sob pastagem. Esses valores são diferentes estatisticamente pelo teste F dos valores médios 0,121; 2,277 e 10,446 para m , n e η , respectivamente, para o solo sob caatinga (Tabelas A 16, A 17 e A 18).

De acordo com os critérios de Warrick & Nielsen (1980), os parâmetros de formas de $h(\theta)$ e $K(\theta)$, apresentaram coeficientes de variação considerados baixos, para m , n e η do solo sob pastagem e baixo para o n e médios coeficientes de variação para m e η para o solo sob caatinga (Tabela 11). Os parâmetros de forma m , n e η de ambas as áreas seguem distribuição normal segundo o teste Kolmogorov - Smirnov com 95 % de probabilidade.

Lassabatère et al. (2006) estudaram três diferentes solos: um solo siltoso extremamente fino (Roujan); um solo estruturado com partículas maiores que 2 mm (Django Reinhardt) e um solo com aspectos texturais e estruturais intermediários aos dois primeiros solos (Chernobyl), e obtiveram respectivamente os seguintes valores para m , n e η : 0,089; 2,20 e 13,20 para Roujan; 0,327; 2,97 e 5,06 para Chernobyl; e 0,246; 2,65 e 6,07 para Django Reinhardt. Já Souza et al. (2008) obtiveram valores de 0,13, 2,31, 9,54 respectivamente para m , n , η em Neossolo Flúvico de textura areia franca e 0,21; 2,54 e 6,70 respectivamente para m , n , η para Neossolo Flúvico textura areia.

Mubarak et al. (2009) estudaram às mudanças na estrutura do solo sob alta frequência de irrigação por gotejamento, utilizando o método Beerkan e obtiveram valores que variam entre 0,093 a 0,095; 2,20 a 2,21 e 12,52 a 12,93 para m , n e η respectivamente.

Os valores e m , n e η encontrados no presente trabalho estão próximos aos encontrados por esses autores.

Tabela 7. Estatística dos parâmetros de forma das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ (m , n e η) do solo sob pastagem e sob caatinga

Parâmetros estatísticos	Pastagem			Caatinga		
	m	n	η	M	n	η
Média (μ)	0,128	2,296	9,822	0,121	2,277	10,446
Mediana (Med)	0,126	2,290	9,881	0,121	2,276	10,236
Desvio - Padrão(σ)	0,012	0,032	0,687	0,0199	0,052	1,385
Variância (σ^2)	0,0001	0,0010	0,473	0,0004	0,003	1,920
Coef. de Variação (CV%)	9,37	0,04	6,99	16,44	2,28	13,25
Assimetria (Cs)	1,044	1,159	-0,303	0,469	0,607	0,501
Valor Máximo ($V_{\text{máx}}$)	0,173	2,418	12,119	0,174	2,423	14,585
Valor Mínimo ($V_{\text{mín}}$)	0,098	2,219	7,781	0,079	2,172	7,724
Número de observações (N)	107	107	107	66	66	66
Kolmogorov - Smirnov	0,0950*	0,1004*	0,0625*	0,0774*	0,0866*	0,1163*

*Normal a 95% de probabilidade

Os semivariogramas dos parâmetros de forma m , n e η das duas áreas experimentais são apresentados na Figura 13, também ajustado pelo modelo esférico para as duas áreas. Os modelos tiveram bons ajustes segundo o teste Jack-Knifing, onde as médias dos erros (R_i) foram próximas de zero e as variâncias próximas a um (Tabela 8). Os três parâmetros para as duas áreas apresentaram dependência espacial moderadas.

O alcance de 240 m obtidos pelos três parâmetros na área de pastagem é superior àqueles obtidos na área de caatinga (80, 100 e 80 m, respectivamente para m , n e η). Isso mostra que os parâmetros de forma do solo sob pastagem possuem uma correlação a maiores distâncias quando comparado ao solo sob caatinga para esses parâmetros.

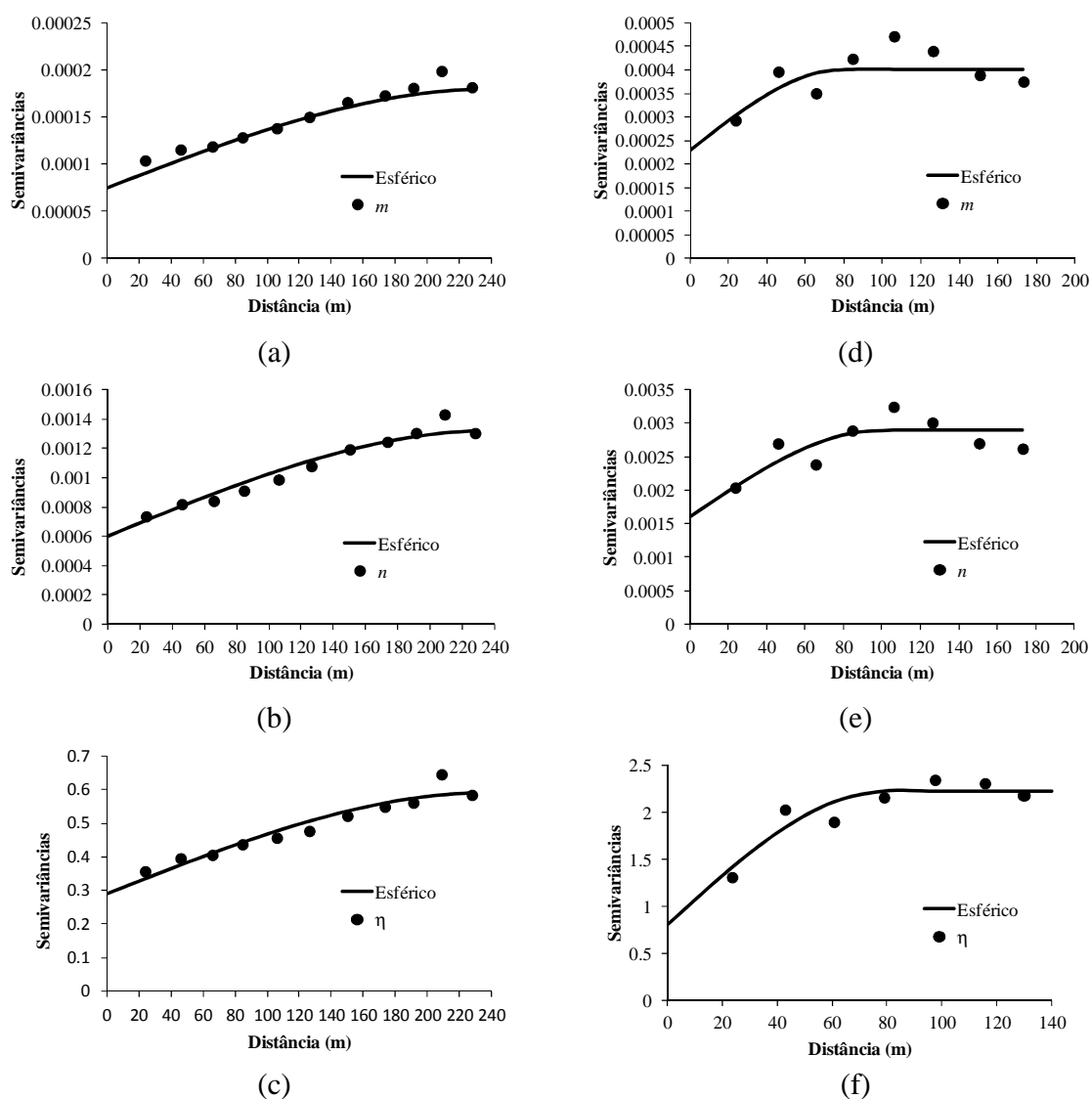


Figura 13. Semivariogramas experimental e teórico dos parâmetros de forma das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ (m , n e η) do solo sob pastagem (a, b e c), e sob caatinga (d, e e f)

Tabela 8. Geoestatística dos parâmetros de forma das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ do solo sob pastagem e sob caatinga

Propriedades	Modelo	C_0	C_1	A (m)	R^2	Teste Jack-Knifing	
						μ_{R_i}	σ_{R_i}
Pastagem							
M	Esférico	0,000075	0,000105	240	0,974	-0,0057	1,2366
N	Esférico	0,0006	0,00072	240	0,969	-0,0057	1,1168
η	Esférico	0,291	0,30000	240	0,921	0,0057	1,1146
Caatinga							
M	Esférico	0,00023	0,00017	80	0,666	0,0069	0,7559
N	Esférico	0,0016	0,0013	100	0,729	0,0067	0,8116
η	Esférico	0,800	1,430	80	0,842	-0,0092	0,8318

C_0 é o efeito pepita; C_1 é a dispersão da variância; A é o alcance e R^2 é o coeficiente de determinação. μ_{R_i} e σ_{R_i} são a média e a variância do erro reduzido R_i obtidos pela técnica da validação cruzada.

O comportamento espacial dos parâmetros de forma das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ do solo sob pastagem e sob caatinga é apresentado na Figura 14. Nota-se uma disposição muito semelhante entre m e n , e um comportamento contrário para o parâmetro η para as duas áreas analisadas. Esse fato deve-se provavelmente ao formalismo matemático e a relação que envolve os parâmetros m , n e η , onde m e n são diretamente proporcionais, e estes são inversamente proporcionais a η (Equações 4, 5 e 9).

Como os parâmetros de forma dependem essencialmente da textura há uma forte similaridade entre os mapas da Figura 14 e os mapas da Figura 8. Nota-se uma sobreposição principalmente entre os mapas de areia e silte com os mapas dos parâmetros m , n e η . Essa similaridade foi notada também por Souza (2005) que observou uma semelhança entre os mapas dos parâmetros m , n e η , e os mapas das três componentes texturais no Neossolo Flúvico. De forma contrária ocorreu, no Latossolo Amarelo onde os mapas de n e η assemelharam-se apenas ao mapa da fração silte.

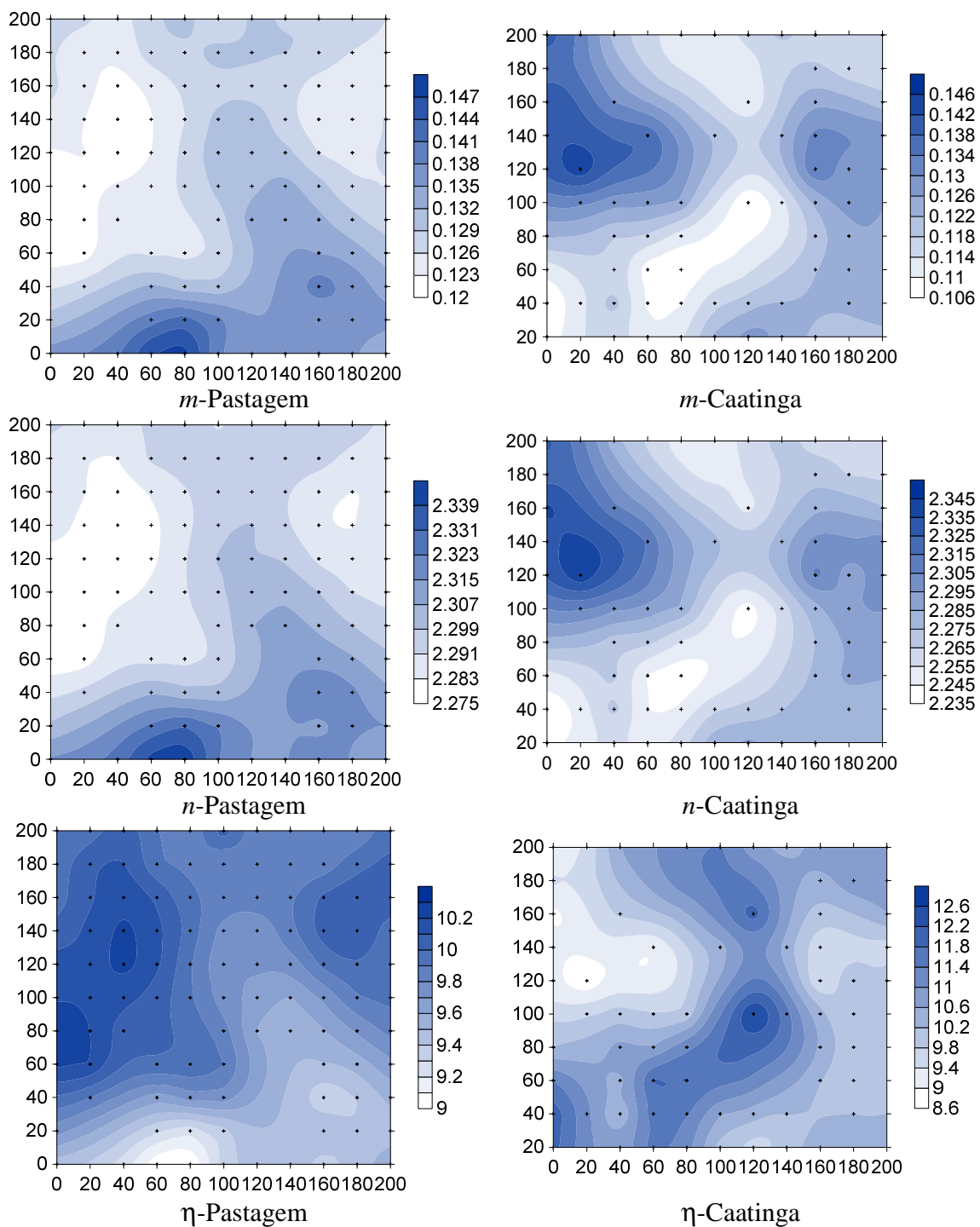


Figura 14. Mapa de isolinhas para os parâmetros de forma das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ (m , n e η) do solo sob pastagem e sob caatinga

3.2.3. Parâmetros hidrodinâmicos (S , K_s e h_g)

A estatística dos parâmetros hidrodinâmicos sorvidade (S), condutividade hidráulica saturada (K_s) e potencial de entrada de ar (h_g) são apresentados na Tabela 9. Os valores médios de S , K_s e h_g foram respectivamente $0,824 \text{ mm s}^{-1/2}$, $0,063 \text{ mm s}^{-1}$ e $-22,29 \text{ mm}$ para o solo sob pastagem e $1,008 \text{ mm s}^{-1/2}$, $0,107 \text{ mm s}^{-1}$ e $-17,67 \text{ mm}$ respectivamente para S , K_s e h_g do solo sob caatinga. Os valores médios de todos os parâmetros hidrodinâmicos da área de caatinga foram significativamente maiores aos da pastagem pelo teste F a 99% de probabilidade (Tabelas A 19; A 20 e A 21).

Tabela 9. Estatística dos Parâmetros hidrodinâmicos (S , K_s e h_g) do solo sob pastagem e sob caatinga

Parâmetros estatísticos	Pastagem			Caatinga		
	$S(\text{mm s}^{-1/2})$	$K_s(\text{mm s}^{-1})$	$h_g(\text{mm})$	$S(\text{mm s}^{-1/2})$	$K_s(\text{mm s}^{-1})$	$h_g(\text{mm})$
Média (μ)	0,824	0,063	-22,29	1,008	0,107	-17,67
Mediana (Med)	0,805	0,052	-16,60	0,959	0,093	-13,82
Desvio - Padrão(σ)	0,291	0,039	23,60	0,357	0,074	11,30
Variância (σ^2)	0,084	0,002	556,93	0,127	0,005	127,86
Coef. de Variação (CV%)	35,31	3,17	105,87	35,41	69,16	63,95
Assimetria (Cs)	0,963	2,339	-4,529	0,882	1,401	-3,197
Valor Máximo ($V_{\text{máx}}$)	1,998	0,288	-5,226	2,390	0,386	-6,486
Valor Mínimo ($V_{\text{mín}}$)	0,307	0,008	-200,00	0,358	0,011	-71,23
Número de observações (N)	107	107	107	66	66	66
Kolmogorov - Smirnov	0,084*	0,131*	0,235	0,072*	0,102*	0,166*

*Distribuição Normal a 95% de probabilidade

A sorvidade (S) traduz a capacidade do solo absorver água por capilaridade e depende essencialmente da variação do teor volumétrico de água entre o início e o final da infiltração. De acordo com Souza (2005), esse parâmetro varia para cada tipo de solo, dependendo essencialmente da sua estrutura e da sua umidade inicial θ_0 .

Logo se espera que o solo da caatinga que obteve menores valores de θ_0 e ρ_s , apresente maiores valores de S que no solo sob pastagem. De forma semelhante ocorre para

a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) que apresentou valores maiores para solo sob caatinga que sob pastagem, tal diferença pode ser atribuída tanto à distribuição dos tamanhos das partículas da fração de areia fina como à densidade do solo nos dois usos, $1,39 \text{ g cm}^{-3}$ para o solo sob pastagem e $1,31 \text{ g cm}^{-3}$ para o solo sob caatinga.

Nota-se um efeito negativo da pastagem nos parâmetros hidrodinâmicos, pois, para a K_s os valores médios para o solo com caatinga foram quase o dobro que no solo com pastagem. Além disso a sorvidade também foi afetada pela pastagem, esta teve uma redução de cerca de 20% em média quando comparada com o solo sob caatinga.

Segundo Parente et al. (2010) um solo bem estruturado, menos compactado, pode apresentar valores de sorvidade e condutividade maiores e, devido ao conteúdo de matéria orgânica, consegue reter mais água.

Souza et al. (2007) avaliando o efeito do encrostamento superficial nas propriedades hidráulicas de um solo cultivado com mamona, observaram que os valores da condutividade hidráulica e da sorvidade foram maiores para as superfícies sem crostas que para as superfícies com crosta, estando de acordo com as diferenças observadas nas lâminas infiltradas enquanto os valores de θ_0 e de θ_s foram menores para as superfícies sem crostas que para as superfícies com crostas.

Souza et al. (2008) estimaram a sorvidade e condutividade com o modelo BEST em três amostra de um Latossolo Amarelo e três amostras de um Neossolo Flúvico, e verificaram uma variação entre 0,49 e 2,48 $\text{mm s}^{-1/2}$ para sorvidade e entre 0,01 e 0,19 mm s^{-1} para a condutividade hidráulica.

Segundo os limites de coeficiente de variação (CV), todos os parâmetros hidrodinâmicos estudados apresentaram média variabilidade, com exceção do parâmetro h_g do solo s pastagem que obteve baixa variabilidade.

A distribuição segundo o teste Kolmogorov-Smirnov de todos os parâmetros hidrodinâmicos, com exceção de h_g do solo sob pastagem, foi normal com 95% de probabilidade.

Os parâmetro S , K_s e h_g do solo sob pastagem apresentaram moderada dependência espacial segundo o critério estabelecido por Cambardella et al. (1994), já para o solo sob caatinga não foi detectada estrutura de dependência espacial para esses parâmetros (Figura

15). A ausência de dependência indica que a distribuição espacial do atributo na área de estudo é homogênea, aleatória ou que a malha amostral utilizada não possui pontos suficientes para detectar a dependência que, se existir, será manifestada à distâncias menores que o menor espaçamento entre amostras (GUIMARÃES, 2004).

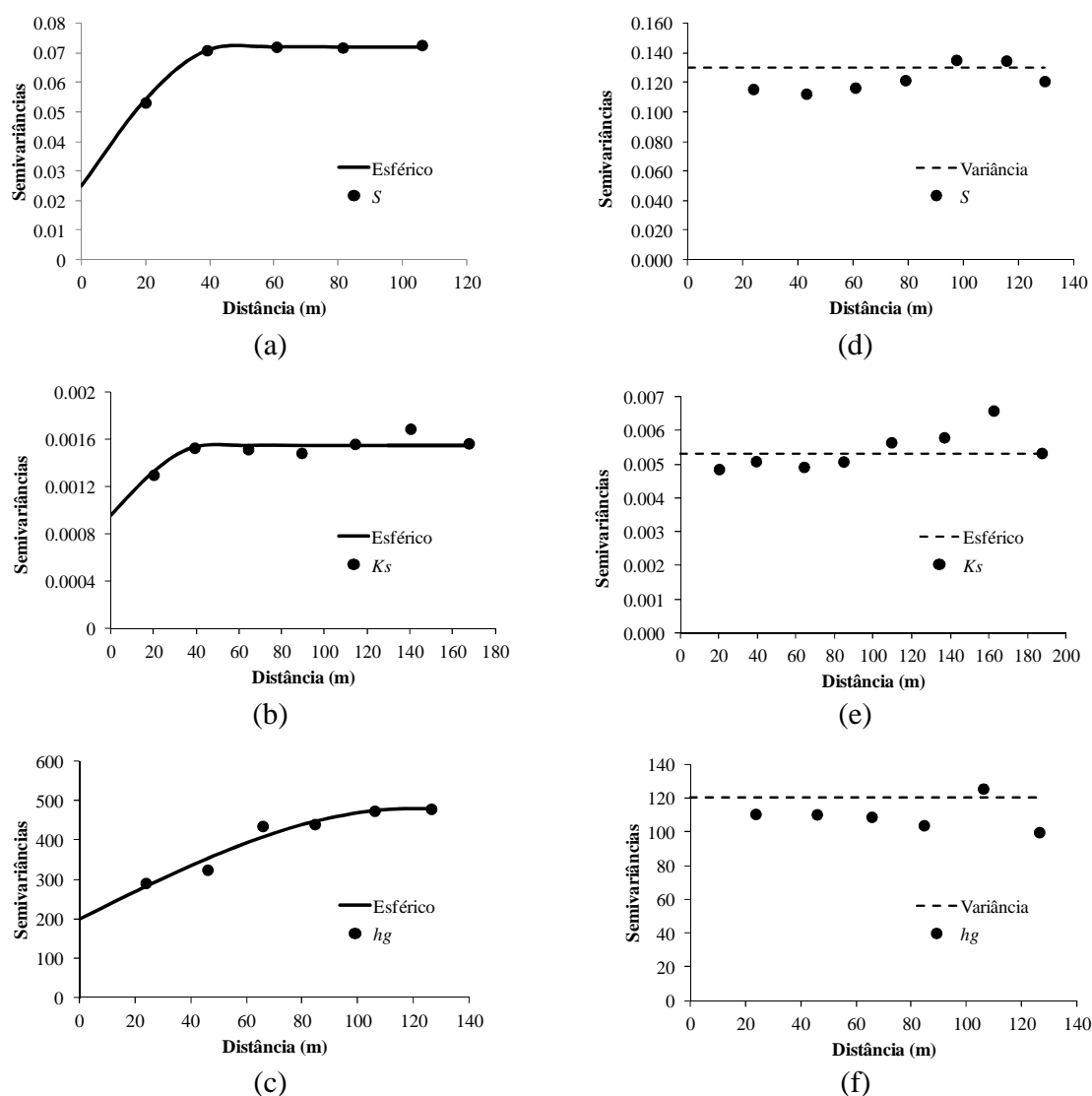


Figura 15. Semivariogramas experimental e teórico dos parâmetros hidrodinâmicos (S , K_s e h_g) do solo sob pastagem (a, b e c), e sob caatinga (d, e e f)

A geoestatística dos parâmetros hidrodinâmicos das duas áreas em estudo é apresentada na Tabela 10. O modelo ajustado aos semivariogramas, mais uma vez foi o

esférico, e que de acordo com os valores de R^2 e do teste Jack-Knifing obtiveram bons ajustes. O parâmetro K_s , comparado aos outros, não teve um bom ajuste, uma vez que a variância do erro reduzido R_i teve valor pouco distante a um.

Tabela 10. Geoestatística dos parâmetros hidrodinâmicos (S , K_s e h_g) do solo sob pastagem e sob caatinga

Propriedades	Modelo	C_0	C_1	A (m)	R^2	Teste Jack-Knifing	
						μ_{R_i}	μ_{R_i}
Pastagem							
S	Esférico	0,025	0,047	45	0,999	0,0083	0,8852
K_s	Esférico	0,00096	0,00059	45	0,703	0,0047	0,6591
h_g	Esférico	200	280	120	0,946	-0,0849	0,9518
Caatinga							
S	*						
K_s	*						
h_g	*						

C_0 é o efeito pepita; C_1 é a dispersão da variância; A é o alcance e R^2 é o coeficiente de determinação.
*Puramente aleatório.

A Figura 16 apresenta os mapas de isolinhas para os parâmetros hidrodinâmicos S , K_s e h_g das duas áreas estudadas. Observa-se que os mapas de S e K_s apresentam comportamento semelhante para as duas áreas, podendo-se observar que as faixas de solos mais condutivas são as que apresentam também valores altos de sorvidade. De forma semelhante Souza et al.(2008) relataram que para Neossolo Flúvico a K_s e S apresentaram distribuição comum no espaço.

Na análise visual dos mapas de S e K_s (Figura 16) do solo sob pastagem uma pequena tendência de maiores valores na margem inferior direita e margem superior ao centro, esse comportamento é pouco semelhante a disposição dos parâmetro m e n (Figura 16). Para o h_g do solo sob pastagem nota-se um gradiente do centro as margens, essa distribuição se assemelha a distribuição da θ_0 (Figura 12).

No solo sob caatinga os maiores valores de S e K_s tem uma pequena concentração do lado direito dos mapas e os maiores valores de h_g se concentram no lado esquerdo do mapa.

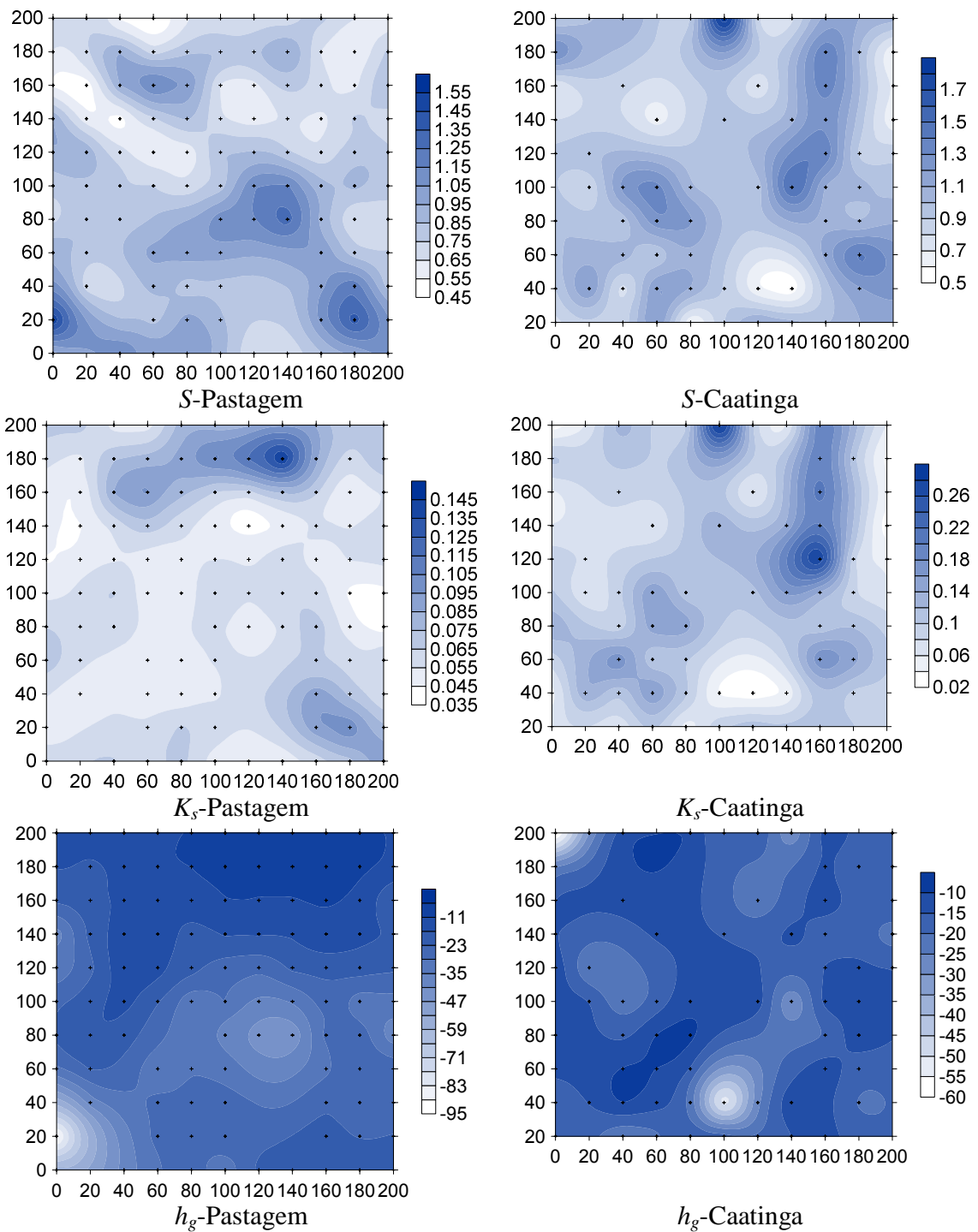


Figura 16. Mapa de isolinhas para os parâmetros hidrodinâmicos (S , K_s e h_g) do solo sob pastagem e sob caatinga

3.2.4. Escalas características (λ_m e C_{λ_m})

Durante o processo de infiltração tridimensional os fatores que podem afetar o fluxo de entrada de água no solo, são: a geometria da fonte de água, a capilaridade e a gravidade. Uma das formas de se caracterizar esses fatores é a partir de escalas características.

Na Tabela 11 é apresentada a estatística das escalas características do solo, raio característico de poros hidraulicamente (λ_m) e a quantidade de poros hidraulicamente ativos por unidade de área C_{λ_m} . Os valores médios de λ_m e C_{λ_m} foram respectivamente 0,56 mm e $3,61 \cdot 10^4$ N° de poros m^{-2} para o solo sob pastagem e 0,51 mm e $2,03 \cdot 10^3$ N° de poros m^{-2} para o solo sob caatinga. Estes valores estão pouco acima dos encontrados por Souza et al. (2008) que obtiveram valores de λ_m para três amostras de um Latossolo Amarelo e três amostras de um Neossolo Flúvico variando entre 0,05 e 0,38 mm. Já Souza et al. (2007) encontraram valores de λ_m e C_{λ_m} respectivamente iguais a 0,16 mm e $3,06 \cdot 10^4$ N° de poros m^{-2} , para a superfície sem crosta, e 0,19 mm e $0,54 \cdot 10^4$ N° de poros m^{-2} , para a superfície com crosta.

Os valores médios de λ_m e C_{λ_m} são diferentes estatisticamente pelo teste F com 99% de probabilidade para as duas áreas estudadas, ambos são maiores no solo sob pastagem, apesar de apresentar valores menores de λ_m e C_{λ_m} o solo sob caatinga apresentou-se mais condutivo que o solo sob pastagem isso provavelmente é devido a conectividade entre os poros ser maior no solo sob caatinga.

Souza et al. (2006), associam a presença de poros arredondados com menor condução de água ao longo do perfil, em razão da provável baixa conectividade entre esses poros, enquanto que Gomes (2008) relata que poros complexos contribuem de forma inversa para a infiltração de água no solo.

Segundo os limites de coeficiente de variação (CV), proposto por Warrick e Nielsen (1980), os dados referentes λ_m e C_{λ_m} do solo com pastagem apresentaram média variabilidade. Para o solo sob caatinga os dados apresentaram média e alta variabilidade respectivamente para λ_m e C_{λ_m} .

A distribuição segundo o teste Kolmogorov-Smirnov da escala característica λ_m foi normal a 99% de probabilidade para solo sob pastagem e a 95% de probabilidade para o solo sob caatinga, o C_{λ_m} não apresentou distribuição normal para as duas áreas em estudo.

Tabela 11. Estatística das escalas características (λ_m e C_{λ_m}) dos solos sob pastagem e sob caatinga

Parâmetros estatísticos	Pastagem		Caatinga	
	λ_m (mm)	C_{λ_m}	λ_m (mm)	C_{λ_m}
Média (μ)	0,5602	3,61 10 ⁴	0,5155	2,03 10 ³
Mediana (Med)	0,4415	333,25	0,5301	302,32
Desvio - Padrão(σ)	0,3538	3,26 10 ⁵	0,2079	5,85 10 ³
Variância (σ^2)	0,1251	1,06 10 ¹¹	0,0432	3,41 10 ⁷
Coef. de Variação (CV%)	63,14	902,60	40,33	286,87
Assimetria (Cs)	0,7003	10,310	0,456	4,502
Valor Máximo ($V_{máx}$)	1,402	3,37 10 ⁶	1,129	3,57 10 ⁴
Valor Mínimo ($V_{mín}$)	0,036	2,33	0,102	11,17
Número de observações (N)	107	107	66	66
Kolmogorov - Smirnov	0,1443**	0,47885	0,08269*	0,38066

*Distribuição Normal a 95% de probabilidade

**Distribuição Normal a 99% de probabilidade

Os semivariogramas experimental e teórico das escalas características λ_m e C_{λ_m} das duas áreas são apresentadas na Figura 17. Para o solo sob pastagem as escalas características λ_m e C_{λ_m} apresentaram estrutura de dependência espacial, sendo o modelo esférico ajustado para ambas às escalas, para o solo sob caatinga não foi identificado estrutura de dependência espacial sendo considerado totalmente aleatório.

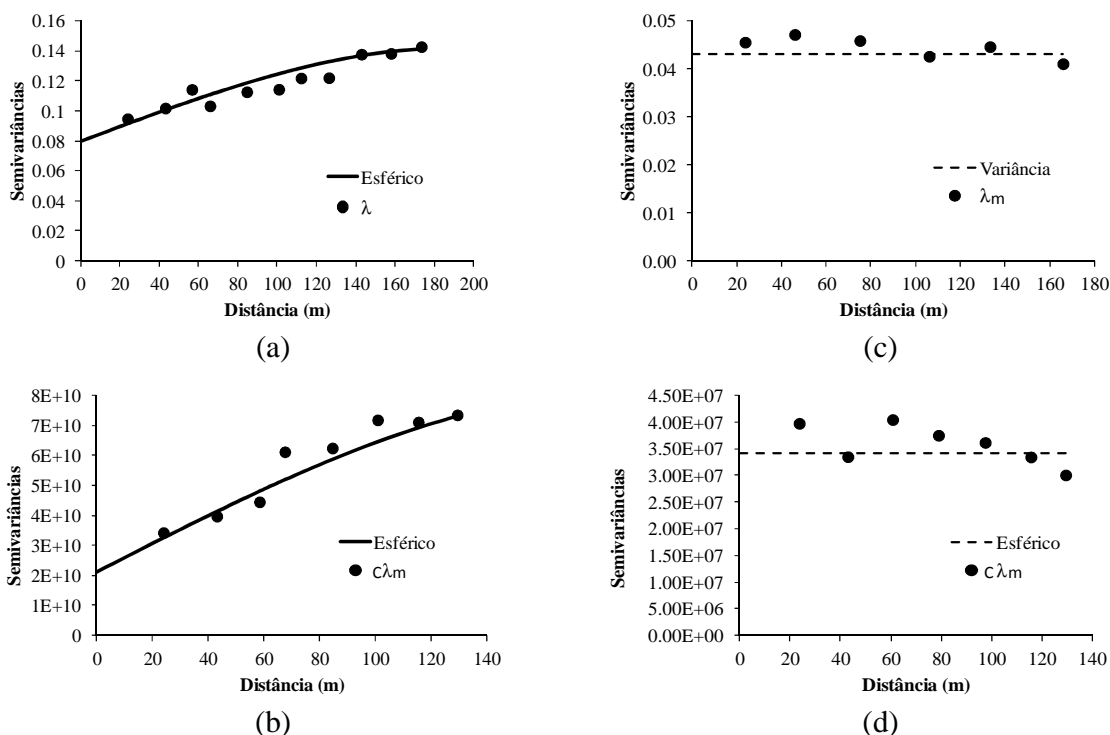


Figura 17. Semivariogramas experimental e teórico das escalas características (λ_m e C_{λ_m}) do solo sob pastagem (a e b), e sob caatinga (c e d)

A geoestatística das escalas características λ_m e C_{λ_m} é apresentada na Tabela 12. O valor do alcance foi de 190 m para λ_m e 125m para C_{λ_m} , o alcance estabelece o limite de dependência espacial entre as amostras, desta forma, amostras separadas por distâncias iguais ou menores que o alcance estão correlacionadas umas às outras.

De acordo com os critérios de Cambardella et al. (1994), os semivariogramas são considerados como de moderada dependência espacial. O teste Jack-Knifing verificou que o semivariograma do λ_m teve um bom ajuste. Por outro lado, o semivariograma do C_{λ_m} não foi bem ajustado segundo o teste Jack-Knifing. Contudo, nota-se que visualmente (Figura 17 (b)) o semivariograma representa bem os dados, provavelmente por conta da ordem de grandeza de C_0 e C_1 que obtiveram valores na ordem de 10^{10} o valor da variância 2,81 muito distante de um.

Tabela 12. Geoestatística das Escalas características (λ_m e C_{λ_m}) do solo sob pastagem e sob caatinga

Propriedades	Modelo	C_0	C_1	A (m)	R^2	Teste Jack-Knifing	
						μ_{Ri}	μ_{Ri}
Pastagem							
λ_m (mm)	Esférico	0,08	0,062	190	0,873	-0,0015	0,921
C_{λ_m}	Esférico	$2,1 \cdot 10^{10}$	$6,0 \cdot 10^{10}$	125	0,928	-0,067	2,812
Caatinga							
λ_m (mm)	*						
C_{λ_m}	*						

C_0 é o efeito pepita; C_1 é a dispersão da variância; A é o alcance e R^2 é o coeficiente de determinação.
*Puramente aleatório

A Figura 18 apresenta a disposição espacial das escalas características λ_m e C_{λ_m} através de mapas de isolinhas para as duas áreas estudadas. Visualmente, o mapa λ_m do solo sob pastagem apresenta uma concentração de poros com maiores raios na parte superior do mapa (maiores cotas). Para o solo com caatinga nota-se aleatoriedade na disposição dos raios característico dos poros e provavelmente deve-se ao fato que em uma área de mata os eventos de crescimento/morte de plantas, ação de microrganismos, entre outro não seguem uma distribuição, e são também aleatórios (RODRIGUES et al., 2006).

A disposição da quantidade de poros hidráulicamente ativos por unidade de área (C_{λ_m}) para os dois solos analisadas sofreram pouca variação sendo praticamente constantes (Figura 18).

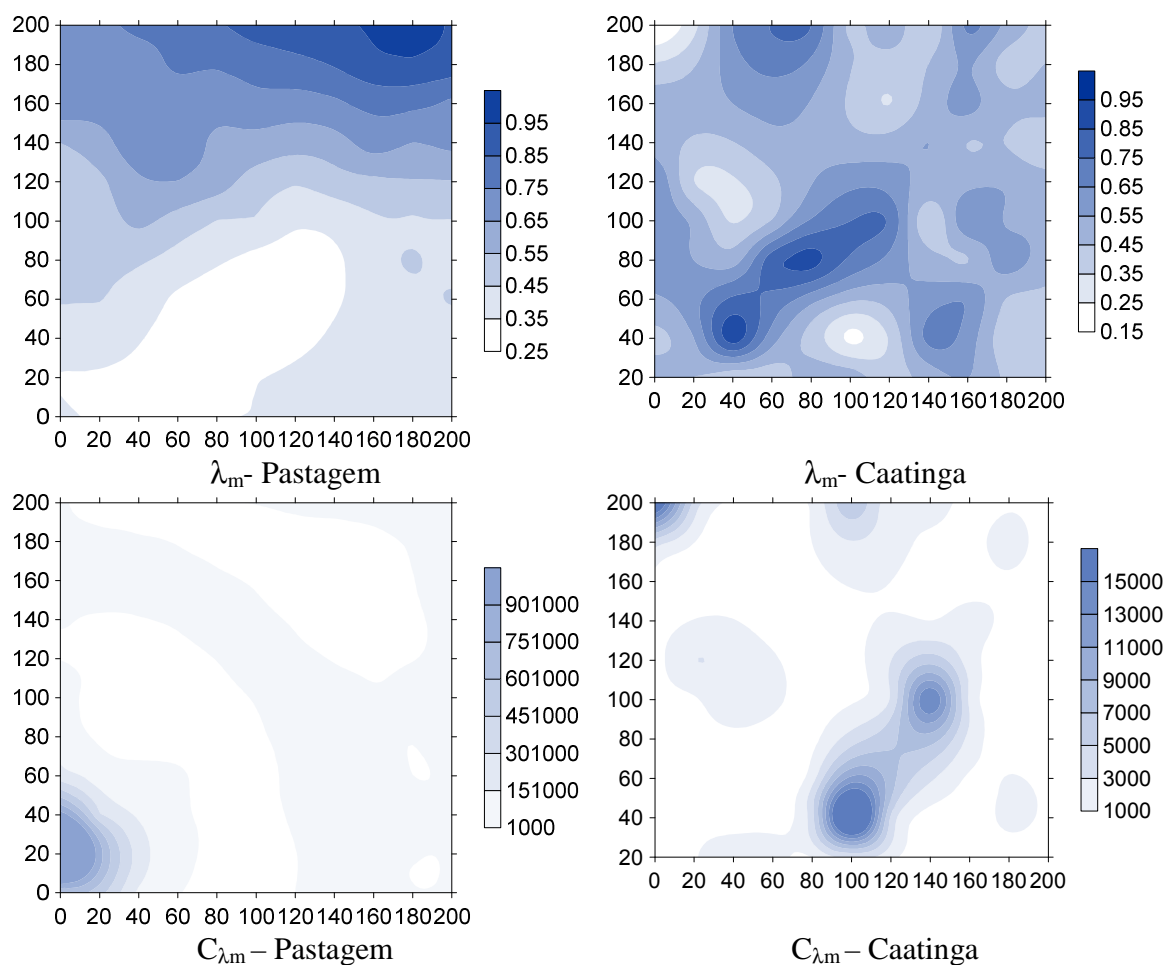


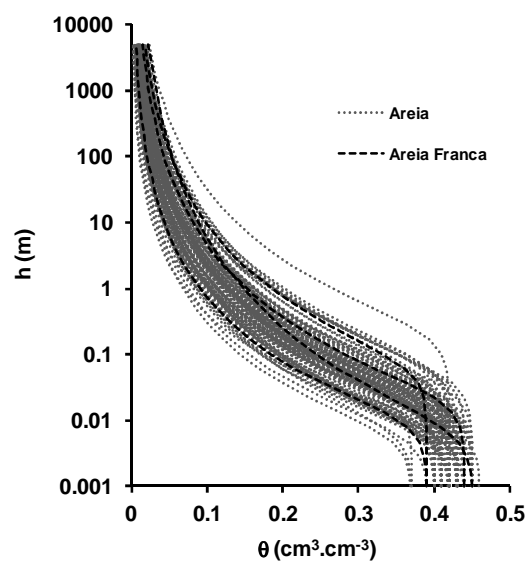
Figura 18. Mapa de isolinhas para as escalas características (λ_m e C_{λ_m}) do solo sob pastagem e sob caatinga

3.3. Curvas de retenção e da condutividade hidráulica da água no solo

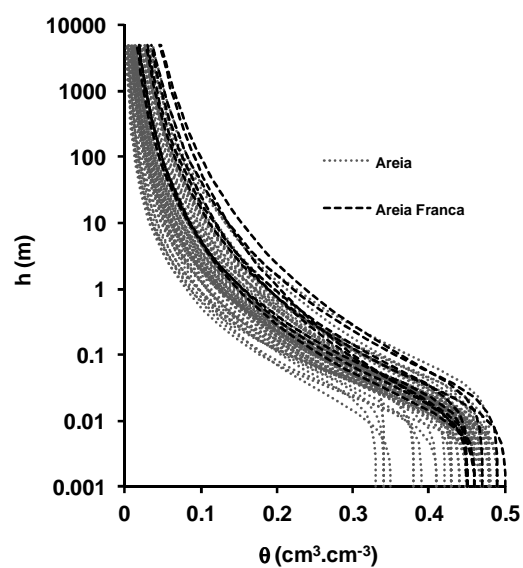
Após a definição dos parâmetros de forma (m , n e η) e de normalização (θ_s , K_s e h_g) das Equações 1 e 2, foi possível a construção das curvas de retenção (Figura 19) e de condutividade (Figura 20).

A curva de retenção pode ser definida como sendo a relação funcional entre a quantidade de solução em um volume do solo em equilíbrio com a tensão aplicada. Observa-se que em cada curva θ_s , foi determinado durante os ensaios de infiltração. Logo após a saturação as curvas apresentam um ponto de inflexão, onde os valores de θ

começam a diminuir, esse ponto correspondente ao valor do potencial de entrada de ar (h_g) na matriz porosa do solo (SOUZA et al. 2008).



(a)



(b)

Figura 19. Curvas de retenção da água no solo sob pastagem (a) e sob caatinga (b)

Analisando-se as curvas, observa-se que a variação nos teores de umidade são mais dispersos no solo com caatinga, nota-se que nas curvas de retenção do solo sob pastagem os

valores de umidade entre $0,37$ e $0,46 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ atingindo valor máximo de umidade de $0,49 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ enquanto que no solo sob caatinga os valores concentram-se entre $0,33$ e $0,50 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ com valor máximo de $0,51 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, para um potencial de $h = 0,1$ as umidades do solo correspondentes ao solo sob pastagem e ao solo sob caatinga variaram respectivamente de $0,2$ a $0,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e para $h = 10 \text{ m}$, os valores de θ variaram entre $0,04$ a $0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,03$ a $0,19$ respectivamente para o solo sob pastagem e solo sob caatinga (Figura 20 (a) e (b)). Observando a Figura 20 nota-se que as curvas médias para as duas áreas em estudos são semelhantes para valores de h superiores a $0,015 \text{ m}$, também nota-se que em todos os potenciais os valores de umidade são maiores no solo sob caatinga, evidenciado a maior capacidade de retenção neste solo.

Os principais fatores que podem causar distinção nas curvas de retenção são: a estrutura do solo, o teor de umidade inicial, o índice de vazios, o tipo de solo, entre outros fatores (SILVA et al., 2006b). De acordo com Trentin (2005), mesmo que os solos pertençam à mesma classe textural, podem ter curvas de retenção distintas, principalmente devido às diferenças de granulometria, teor de matéria orgânica, tipo de argila e diferenças de microestrutura.

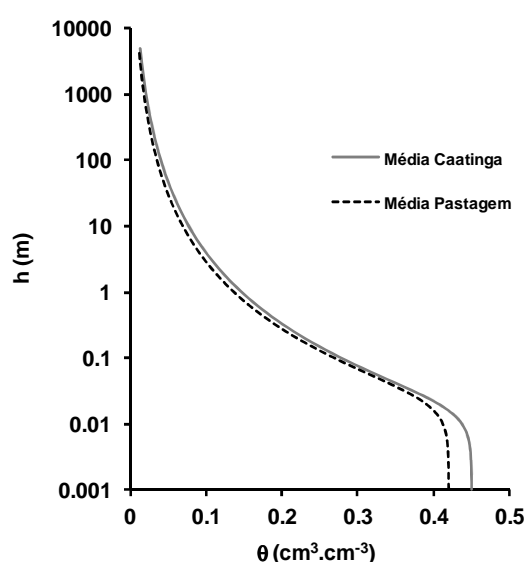


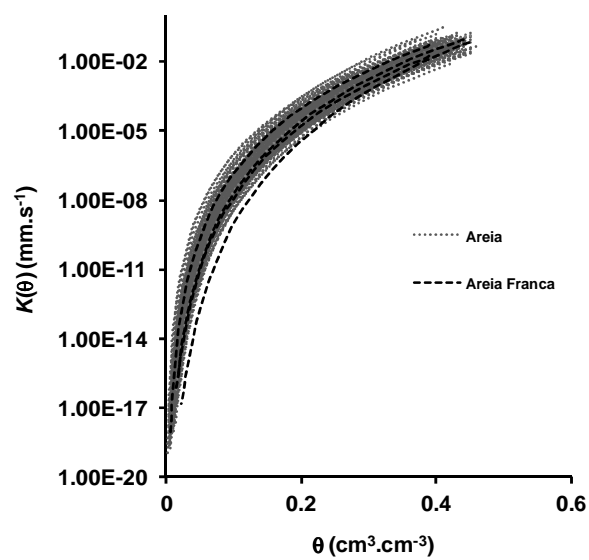
Figura 20. Curvas de retenção médias para o solo sob pastagem e sob caatinga

As curvas de condutividade hidráulica $K(\theta)$ são apresentadas na Figura 21, nota-se pouca diferença entre as curvas do solo sob pastagem (Figura 22 (a)) e as curvas do solo com caatinga (Figura 21 (b)) é evidente uma maior dispersão entre as curvas do solo sob caatinga, isso se deve ao fato que na pastagem as condições são mais homogêneas, praticamente só um espécie ocupa o espaço, já no solo sob caatinga são inúmeras espécies que competem entre si, e ocupam a mesma área com porte e fisiologia diferente também é encontrada áreas de intenso acúmulo de matéria orgânica, outras sem nenhum resíduo orgânico.

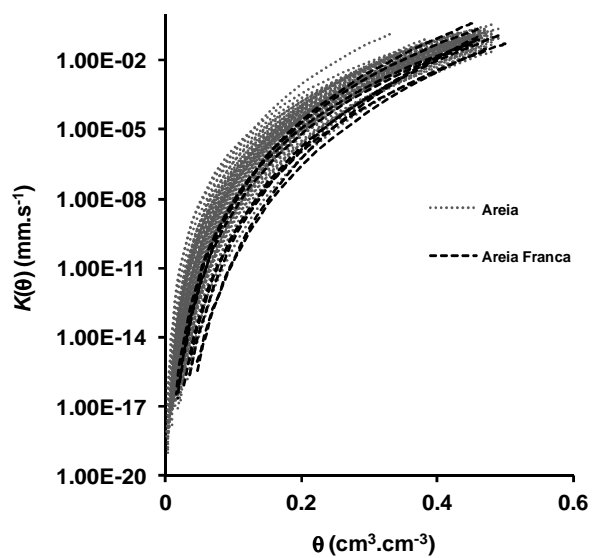
Toda essa variabilidade é refletida nas curvas de retenção e condutividade hidráulica, no solo sob caatinga foi observado maior variabilidade.

Na Figura 22 é apresentado as curvas de condutividade hidráulica médias para o solo sob pastagem e sob caatinga, nota-se uma expressiva diferença entre as curvas médias para os dois usos do solo, onde o solo sob caatinga mostrou-se mais condutivo que o solo sob pastagem, sendo praticamente o dobro o valor da condutividade saturado do solo sob caatinga em relação ao solo sob pastagem.

Pinheiro &Teixeira (2009) relatam a existência de gradiente dos potenciais totais na matriz do solo, variando da mata nativa, para floresta de *Pinus*, e pastagem e milho. Segundo os mesmos autores isto implica considerar que a curva de condutividade hidráulica apresenta uma variação que está associada ao uso florestal, passando pela agricultura e finalizando com a pastagem.



(a)



(b)

Figura 21. Curva de condutividade hidráulica no solo sob pastagem (a) e sob caatinga (b)

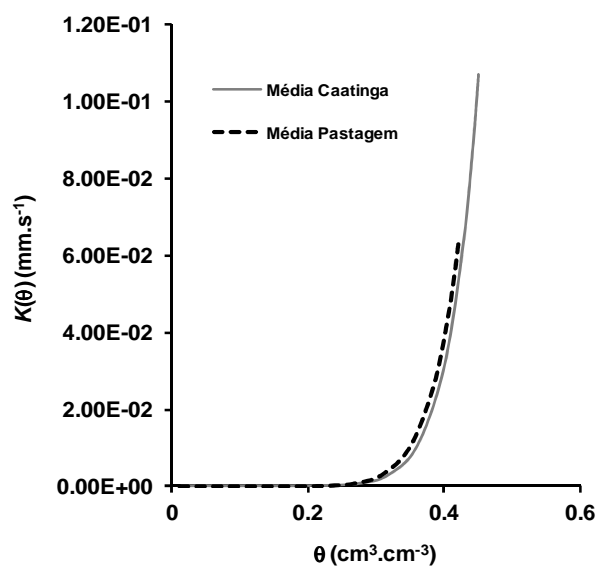


Figura 22 Curvas de condutividade hidráulica médias para o solo sob pastagem e sob caatinga.

4. CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa apresentaram as seguintes conclusões:

O manejo do solo com pastagem alterou significativamente, pelo Teste F a 99% de probabilidade, todas as variáveis analisadas, com destaque para densidade do solo (ρ_s) e condutividade hidráulica (K_s) que foram as mais afetadas. Contudo salienta-se que os níveis de alteração não são limitantes ao desenvolvimento das culturas.

A análise geoestatística identificou a existência de estrutura de dependência espacial dos atributos estudados e permitiu o seu mapeamento, utilizando-se técnicas da geoestatística e Krigagem.

O mapeamento das áreas experimentais permitiu a definição de zonas de menor variabilidade das propriedades analisadas para fins estratégicos de manejo do solo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeito da integração lavoura pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 717-723, 2001.
- ANDRADE, A. R. S de. **Aplicação da teoria fractal e da geoestatística na estimativa da condutividade hidráulica saturada e do espaçamento entre drenos**. 2004. p.198 (Tese Doutorado) – Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu-SP.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; REIS, R. M. G.; PARAHYBA, R. B. V.; LIMA, P. C. **Mapa de reconhecimento de baixa-média intensidade de solos do estado de pernambuco na escala 1:100.000**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. (Embrapa Solos, Boletim de Pesquisa; 11).
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.
- BERG, M. V. D.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de características de solos na região do Planalto Médio, Rs: II. Análise da semivariância e da variância. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v.21, p.40-48, 1997
- BERTOL, I.; ALMEIDA, J.A. de; ALMEIDA, E.X. de; KURTZ, C. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem capim-elefante-anão cv. Mott. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1047-1054, 2000.
- BERTOL, I.; GOMES, K.E.; DENARDIN, R.B.N.; MACHADO A.Z.; MARASCHIN, G.E. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, p 779- 786, 1998.
- BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001.

- BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B.; CUNHA FILHO, M; SOUZA, W. S. Características hidráulicas da erosão em sulcos em um Cambissolo do Semiárido do Brasil. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 34, p. 1325-1332, 2010
- BOTTEGA, E. L. QUEIROZ, D. M.; PINTO F. A. C.; SOUZA C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, 2013 .
- BRAUD, I.; De CONDAPPA, D.; SORIA, J.M.; HAVERKAMP, R.; ANGULOJARAMILLO, R.; GALLE, S.; VAUCLIN, M. Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (the Beerkan method). **European Journal of Soil Science**, 14p. Trabalho não publicado.
- BROOKS, R.H.; COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Paper**, v.3, Colorado State Univ. Fort Collins, 1964.
- BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. **America Institute Mining and Metallurgy Engineering**, v.198, p.71-77, 1953
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIM, T. B.; KARLEN, D. I.; TURCO, R. F.; KOOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501 – 1511, 1994.
- CARVALHO, D.F; SILVA, L.D.B. **Hidrologia**. 2006. Cap.5, p.60-80. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/Pesquisainstitutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap5-INF.pdf>>. Acesso em: 10 novembro. 2012.
- CARVALHO, G. R.; CARNEIRO, A. V.; YAMAGUCHI, L. C. T.; MARTINS, P. C.; HOTT, M. C.; REIS FILHO, R. J. C.; OLIVEIRA, M. A. **Competitividade da cadeia produtiva do leite em Pernambuco**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2009. 376 p.
- CASSOL, L.C. **Relação solo-planta-animal num sistema de integração lavoura-pecuária em semeadura direta com calcário na superfície**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 157p., Tese de Doutorado.

- CORSINI, P.C.; FERRAUDO, S.A. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.2, p.289-298, 1999.
- de CONDAPPA, D.; SORIA UGALDE, J. M.; ANGULO-JARAMILLO, R.; HAVERKAMP, R. 2002. Méthode Beerkan. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols non saturés. Rapport interne Hydrologie de la Zone Non Saturés - LTHE, Grenoble: Université de Grenoble, 2002, 82p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2006.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; CECATO, U.; BARBERO, L.M.; LUGÃO, S.M.B; COSTA, M.A.T. Qualidade física do solo em pastagem adubada e sob pastejo contínuo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.1583- 1590, 2008.
- FLORES, J. P. C. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 31:771-780, 2007.
- FUENTES, C. **Approche fractale des transferts hydriques dans les sols non-saturés**. Grenoble, 1992. Tese (Doutorado) - Université Joseph Fourier.
- FUENTES, C.; VAUCLIN, M.; PARLANGE, J.-Y.; HAVERKAMP, R. Soil water conductivity of a fractal soil. In: BAVEYE, P. et al. (eds) **Fractals in soil science**. CRC. 1998. p.333-340.
- GAGGERO, M.R. **Alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo sob sistemas de preparo e pastejo**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998. 125p., Tese de Mestrado.
- GOLDEN SOFTWARE - SURFER FOR WINDOWS. **Surface mapping system**. New York, version 10.1, Inc., 2011
- GOMES M. R. M. **Análise de imagens no estudo da porosidade em latossolo Cultivado com batata (*solanum tuberosum* L.) sob dois sistemas de irrigação**. Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu, 2008. 61p. Dissertação de Mestrado.

- GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. 2004. 76 p.
- HAVERKAMP, R.; ARRUE, J.L.; VANDERVAERE, J.P.; BRAUD, I.; BOULET, G.; LAURENT, J.P.; TAHA, A.; ROSS, P.J.; ANGULO-JARAMILLO, R. **Hydrological and thermal behaviour of the vadose zone in the area of Barrax and Tomelloso (Spain): experimental study, analysis and modeling**. Final integrad report EFEDE II Spain, Project EU no EV% C - CT 92 00 90. Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement, BP 53, 38041 Grenoble Cédex 9, France. 1996.
- HAVERKAMP, R.; BOURAOUI, F.; ANGULO-JARAMILLO, R.; ZAMMIT, C.; DELLEUR, J.W. Soil properties and moisture movement in the unsaturated zone. In: DEULLEUR, J.W. (Ed.). **CRC Groundwater Engineering Handbook**, 120 p. 1998.
- HAVERKAMP, R.; ROSS, P.J.; SMETTEM, K.R.J.; PARLANGE, J.Y. Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. **Water Resources Research**, v.30, p.2931-2935, 1994.
- IBGE. **Produção Agrícola Municipal (Cereais, Leguminosas e Oleaginosas, 2005)**. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Rio de Janeiro, RJ. ISBN 85-240-3890-X, 2006. 65 p.
- KER, J.C.; PEREIRA, N.R.; CARVALHO JÚNIOR, W.; CARVALHO FILHO, A. Cerrados: solos, aptidão e potencialidade agrícola. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO NO CERRADO, 1990, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 1992. p.1-31.
- Köppen, W. P.: **Grundriss der Klimakunde**, 2d ed., Berlin: Walter de Gruyter., 1931
- LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA, J.M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. **BEST – Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters through infiltration experiments or BEST – Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters through robust estimation of scale parameters**. 41 p. 2004. Trabalho não publicado

- LEPSCH, I.F. **Manual para levantamento utilitário de meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso: 4ª aproximação**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991. 175p.
- LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não-irrigado. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.28, p. 945-951, 2004.
- LIMA, V. C.; LIMA, M. R.; MELO, V. F. **O solo no meio ambiente: abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 2007. 130 p.
- MARQUARDT, D.W. An algorithm for least squares estimation of non linear parameters. . **SIAM Journal of Applied Mathematics**, v.11, p.431-441, 1963.
- MIGUEL, F.R.M.; VIEIRA, S.R.; GREGO, C.R. Variabilidade espacial da infiltração de água em solo sob pastagem em função da intensidade de pisoteio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.44, n.11, p.1513-1519, 2009.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A. The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. **Geoderma**, v.107, p.55-70, 2002.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A.B.; BRISTOW, K.L. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. **Geoderma**, v.93, p.225-253, 1999.
- MONTEIRO, A. A.; TAMANINI, R.; SILVA, L. C. C.; MATTOS, M. R.; MAGNANI, D. F. d'OVIDIO L.; NERO, L. A.; BARROS M. A. F.; PIRES, E. M. F.; PAQUEREAU, B. P. D.; BELOTI, V. Características da produção leiteira da região agreste do estado de Pernambuco, Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, p. 665-674, 2007;
- MUBARAK, I.; MAILHOL, J. C.; ANGULO-JARAMILLO R.; RUELLE P.; BOIVIN P.; KHALEDIAN M. Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation. **Geoderma**, v. 150 p 158–165, 2009.

- OLIVEIRA G.C.; SEVERIANO, E.C.; MELLO, C.R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da Microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, p.265-270, 2007.
- OLIVEIRA, J.R.A.; MENDES, I.C.; VIVALDI, L. Carbono da biomassa microbiana em solos de cerrado sob vegetação nativa e sob cultivo: avaliação dos métodos fumigação-incubação e fumigação-extração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.863-871, 2001.
- PARENTE, H.N.; SILVA, D. S.; ANDRADE, A. P.; SOUZA, E. S.; ARAÚJO, K. D.; MAIA, M. O. Impacto do pisoteio caprino sobre atributos do solo em área de caatinga. **Rev. Bras. Saúde Prod**, Salvador, v.11, p. 331-341 , 2010.
- PHILIP, J. R. **Theory of infiltration**. In: Chow, V. T. (ed.). *Advances in Hydroscience*. New York: Academic Press, v.5, p.215-296, 1969.
- PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P. Estimativa das curvas de condutividade hidráulica e de retenção a partir de características físicas do solo. **Revista de Estudos Ambientais**, Blumenau, v.11, n. 1, p. 44-50, 2009.
- RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S.; ISERNHAGEN, I. **Pacto pela restauração da mata atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. São Paulo: LERF/ESALQ: Instituto BioAtlântica, 2009. 256p.
- SALES, L. E. O., CARNEIRO, M. A. C., SEVERIANO, E. C., OLIVEIRA, G. C., FERREIRA M. M. Qualidade física de neossolo quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso agrícola. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, p. 667-674, 2010.
- SANTOS, J. C. B.; SOUZA JÚNIOR V. S.; CORRÊA M. M.; RIBEIRO M. R.; ALMEIDA M. C.; BORGES L. E. P. Caracterização de Neossolos Regolíticos da Região Semiárida do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, p.683-695, 2012.
- SANTOS, J. S.; LIMA, V. L. A.; BORGES JÚNIOR, J. C. F.; SILVA, L. V. B. D.; AZEVEDO, C. A. V. Mobilidade de solutos em colunas de solo com água residuária doméstica e de suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.11, p.1226–1233, 2010.

- SECCO, D.; REINERT, D. . REICHERT, J. M.; ROS C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 05, p. 797-804, 2004.
- SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; CURTI, N.; DIAS JÚNIOR, M.S. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia, GO. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.1, p.159-168, 2009.
- SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistema de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 06, p.921-930, 2006a.
- SILVA, E. M.; LIMA, J. E. F. W.; AZEVEDO, J. A.; RODRIGUES, L. N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.41, n.2, p. 323-330, 2006b.
- SILVA, F. B. R.; SILVA, M. A. V.; BARROS, A. H. C.; SANTOS, J. C. P.; SILVA, A. B.; CAVALCANTI, A. C.; SILVA, F. H. B. B.; BURGOS, N.; PARAHYBA, R. B. V.; OLIVEIRA NETO, M. B.; SOUZA NETO, N. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LOPES, O. F.; LUZ, L. R. Q. P.; LEITE, A. P.; COSTA, L. G. M.; SILVA, C. P. **Zoneamento Agroecológico de Pernambuco - ZAPE**. Recife: Embrapa Solos - Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento - UEP Recife; Governo do Estado de Pernambuco (Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária). (Embrapa Solos. Documentos; no. 35). ZAPE Digital, CD-ROM. 2001.
- SILVA, J. J. N.; MONTENEGRO A. A. A.; SILVA, F. F.; FONTES JÚNIOR R. V. P.; SILVA, A. P. N. Variabilidade espacial de parâmetros de crescimento da mamoneira e de atributos físico-químicos em Neossolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.14, n.9, p.921-931, 2010.
- SILVA, V.R.; REINERT, D. & REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 24, p.191-199, 2000.
- SORIA, J.M.; LEIJ, F.J.; ANGULO-JARAMILLO, R.; FUENTES, C.; HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J.-Y. Aggregation scenarios to model water fluxes in watersheds with

- spatial changes in soil texture. 23rd. Hydrology Days AGU. **Proceedings...** Colorado State University. Fort Collins, Colorado, USA. March 31-April 2, 2003.
- SOUZA, E. S. **Caracterização hidrodinâmica na escala local e da parcela Agrícola de dois solos do estado da Paraíba: variabilidade espacial e temporal, e meio homogêneo equivalente.** Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 2005. 138p. Tese de Doutorado.
- SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; JARAMILLO, R. A.; MACIEL NETTO, A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA E. B. Variabilidade espacial dos parâmetros hidrodinâmicos de duas parcelas agrícolas no estado da Paraíba. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1795-1804, 2008.
- SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; LIMA, J. R. S.; ANGULO-JARAMILLO, R. Mapeamento da probabilidade de ocorrência de classes da sorvidade e da condutividade hidráulica saturada de um Neossolo Flúvico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.3, p.164-172, 2008.
- SOUZA, E. S.; ANTONINO, A.C. D.; LIMA, J. R. S.; GOUVEIA NETO, G. C.; SILVA, J. M.; SILVA, I. F. Efeito do encrostamento superficial nas propriedades hidráulicas de um solo cultivado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.2, n.1, p.69-74, 2007.
- SOUZA, Z. M.; MARTINS FILHO, M. V.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho Amarelo eutroférrico sob cultivo de cana-deaçúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 02. p. 309-319, 2004
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER M.; PEREIRA G. T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, p.487-492, 2006.
- SPERA, S.T.; REATTO, A.; MARTINS, E.S.; CORREIA, J.R.; CUNHA, T.J.F. **Solos areno-quartzosos no Cerrado: problemas, características e limitações ao uso.** Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. 48p. (Documentos, 7).
- STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.2, p.395-401, 2001.

- TANNER, C.B. & MARMARIL, C.P. Pasture soil compaction by animal traffic. **Agronomy Journal**, v. 51, p. 329-331, 1959.
- TAYLOR, H.M. & BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. **Soil Till. Res.**, 19:111-119, 1991.
- TREIN, C.R.; COGO, N.P. & LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia + trevo/milho, após pastejo intensivo **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v 15 p 105–111, 1991.
- TREIN, C.R.; COGO, N.P. & LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia + trevo/milho, após pastejo intensivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 15:105–111, 1991.
- TRENTIN, C. V. **Diagnóstico voltado ao planejamento do uso de águas residuárias para irrigação nos cinturões verdes da região metropolitana de Curitiba.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005, Dissertação (mestrado). Programa de Pós- Graduação em Agronomia. - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- van GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p.892-898, 1980.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VACHAUD, G.; NIELSEN, D. R. The use of cokriging with limited field soil observations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 175 – 184, 1983.
- WAGENET, R.J. Scale issues in agroecological research chains. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.50, p.23–34, 1998.
- WAGNER, B.; TARNAWSKI, V.R.; HENNINGS, V.; MÜLLER, U.; WESSOLEK, G.; PLAGGE, R. Evaluation of pedotransfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. **Geoderma**, v.102, p.275-297, 2001.
- WARICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variabilidade of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980.
- WHITE, I.; SULLY, M. J. Macroscopic and microscopic capillary length and times scales from field infiltration. **Water Resources Research**, v.23, n.8, p.1514-1522, 1987.

- WILLATT, S.T.; PULLAR, D.M. Changes in soil physical properties under grazes pastures. **Australian Journal of Soil Research.**; v. 22, p.343-348, 1983.
- WÖSTEN, J.H.M.; PACHEPSKY, Y.A.A; RAWLS, W.J. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, v.251, p.123–150, 2001.
- ZATARÁIN, F.; FUENTES, C.; HAVERKAMP, R.; ANTONIO, A. C. D. Predicción de La forma de la característica de humedad del suelo a partir de la curva granulométrica. Memorias del XIII Congreso Nacional de Irrigación Zacatecas, Zac., México. Mesa 7, Desarrollo y transferencia de tecnología de riego y drenaje. 2003.
- ZUO, X.; ZHAO, H.; ZHAO, X.; ZHANG, T.; GUO, Y.; WANG, S.; DRAKE, S. Spatial pattern and heterogeneity of soil properties in sand dunes under grazing and restoration in Horqin Sandy Land, Northern China. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.99, n.2, p.202-212, 2008
- ZWIRTES, A. L.; SPOHR R. B.; BARONIO C. A.; ROHR M. R.; MENEGOL D. R. Caracterização físico-hídrica de solos submetidos a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v.4, n.3, p.51-58, 2011.

APÊNDICES

Tabela A 1. Teste de distribuição Kolmogorov - Smirnov das componentes texturais do solo sob pastagem

	Valores de D_{KS}				$ F(O) - F(t) _{\max}$ das componentes texturais		
	n.s.				% areia	% silte	% argila
N_{DV}	0,2	0,1	0,05	0,01			
121	0,097	0,111	0,124	0,148	0,111	0,130	0,313

NDV é o número total de amostra da população observada; $|F(O) - F(t)|_{\max}$ é a diferença entre frequência acumulada observada e teórica máxima; D_{KS} é o coeficiente de Kolmogorov-Smirnov para os respectivos níveis de significância (n.s.). $|F(O) - F(t)|_{\max} < D_{KS}$, aceita a hipótese.

Tabela A 2. Teste de distribuição Kolmogorov - Smirnov das componentes texturais do solo sob caatinga

	Valores de D_{KS}				$ F(O) - F(t) _{\max}$ das componentes texturais		
	n.s.				% areia	% silte	% argila
N_{DV}	0,2	0,1	0,05	0,01			
104	0,105	0,120	0,133	0,160	0,082	0,074	0,193

NDV é o número total de amostra da população observada; $|F(O) - F(t)|_{\max}$ é a diferença entre frequência acumulada observada e teórica máxima; D_{KS} é o coeficiente de Kolmogorov-Smirnov para os respectivos níveis de significância (n.s.). $|F(O) - F(t)|_{\max} < D_{KS}$, aceita a hipótese.

Tabela A 3. Teste de distribuição Kolmogorov - Smirnov dos parâmetros N , M e D_g do solo sob pastagem

	Valores de D_{KS}				$ F(O) - F(t) _{\max}$ das componentes texturais		
	n.s.				N	M	D_g
NDV	0,2	0,1	0,05	0,01			
107	0,103	0,118	0,131	0,158	0,113	0,103	0,075

NDV é o número total de amostra da população observada; $|F(O) - F(t)|_{\max}$ é a diferença entre frequência acumulada observada e teórica máxima; D_{KS} é o coeficiente de Kolmogorov-Smirnov para os respectivos níveis de significância (n.s.). $|F(O) - F(t)|_{\max} < D_{KS}$, aceita a hipótese.

Tabela A 4. Teste de distribuição Kolmogorov - Smirnov dos parâmetros N , M e D_g do solo sob caatinga

	Valores de D_{KS}				$ F(O) - F(t) _{\max}$ das componentes texturais		
	n.s.				N	M	D_g
N_{DV}	0,2	0,1	0,05	0,01			
64	0,132	0,150	0,167	0,201	0,082	0,073	0,072

NDV é o número total de amostra da população observada; $|F(O) - F(t)|_{\max}$ é a diferença entre frequência acumulada observada e teórica máxima; D_{KS} é o coeficiente de Kolmogorov-Smirnov para os respectivos níveis de significância (n.s.). $|F(O) - F(t)|_{\max} < D_{KS}$, aceita a hipótese.

Tabela A 5. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov dos parâmetros ρ_s , θ_0 e θ_s do solo sob pastagem

	Valores de DKS				F(O) - F(t) _{max} das componentes texturais		
	n.s.						
NDV	0,2	0,1	0,05	0,01	ρ_s	θ_0	θ_s
107	0,103	0,118	0,131	0,158	0,073	0,341	0,072

NDV é o número total de amostra da população observada; |F(O) – F(t)|_{máx} é a diferença entre frequência acumulada observada e teórica máxima; DKS é o coeficiente de Kolmogorov-Smirnov para os respectivos níveis de significância (n.s.). |F(O) – F(t)|_{máx} < DKS, aceita a hipótese.

Tabela A 6. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov dos parâmetros ρ_s , θ_0 e θ_s do solo sob caatinga

	Valores de D _{KS}				F(O) - F(t) _{max} das componentes texturais		
	n.s.						
N _{DV}	0,2	0,1	0,05	0,01	ρ_s	θ_0	θ_s
66	0,132	0,150	0,167	0,201	0,205	0,206	0,086

NDV é o número total de amostra da população observada; |F(O) – F(t)|_{máx} é a diferença entre frequência acumulada observada e teórica máxima; DKS é o coeficiente de Kolmogorov-Smirnov para os respectivos níveis de significância (n.s.). |F(O) – F(t)|_{máx} < DKS, aceita a hipótese.

Tabela A 7. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov dos parâmetros m , n e η do solo sob pastagem

	Valores de DKS				F(O) - F(t) _{max} das componentes texturais		
	n.s.						
NDV	0,2	0,1	0,05	0,01	m	n	η
107	0,103	0,118	0,131	0,158	0,095	0,100	0,063

NDV é o número total de amostra da população observada; |F(O) – F(t)|_{máx} é a diferença entre frequência acumulada observada e teórica máxima; DKS é o coeficiente de Kolmogorov-Smirnov para os respectivos níveis de significância (n.s.). |F(O) – F(t)|_{máx} < DKS, aceita a hipótese.

Tabela A 8. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov dos parâmetros m , n e η do solo sob caatinga

	Valores de D _{KS}				F(O) - F(t) _{max} das componentes texturais		
	n.s.						
N _{DV}	0,2	0,1	0,05	0,01	m	n	η
64	0,132	0,150	0,167	0,201	0,077	0,087	0,116

NDV é o número total de amostra da população observada; |F(O) – F(t)|_{máx} é a diferença entre frequência acumulada observada e teórica máxima; DKS é o coeficiente de Kolmogorov-Smirnov para os respectivos níveis de significância (n.s.). |F(O) – F(t)|_{máx} < DKS, aceita a hipótese.

Tabela A 9. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov dos parâmetros S , K_s e H_g do solo sob pastagem

	Valores de DKS				$ F(O) - F(t) _{\max}$ das componentes texturais		
	n.s.				S	K_s	H_g
NDV	0,2	0,1	0,05	0,01			
107	0,103	0,118	0,131	0,158	0,084	0,131	0,235

NDV é o número total de amostra da população observada; $|F(O) - F(t)|_{\max}$ é a diferença entre frequência acumulada observada e teórica máxima; DKS é o coeficiente de Kolmogorov-Smirnov para os respectivos níveis de significância (n.s.). $|F(O) - F(t)|_{\max} < DKS$, aceita a hipótese.

Tabela A 10. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov dos parâmetros S , K_s e H_g do solo sob caatinga

	Valores de D_{KS}				$ F(O) - F(t) _{\max}$ das componentes texturais		
	n.s.				S	K_s	H_g
N_{DV}	0,2	0,1	0,05	0,01			
64	0,132	0,150	0,167	0,201	0,072	0,103	0,167

NDV é o número total de amostra da população observada; $|F(O) - F(t)|_{\max}$ é a diferença entre frequência acumulada observada e teórica máxima; DKS é o coeficiente de Kolmogorov-Smirnov para os respectivos níveis de significância (n.s.). $|F(O) - F(t)|_{\max} < DKS$, aceita a hipótese.

Tabela A 11. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov das escalas características λ_m e $C\lambda_m$ do solo sob pastagem

	Valores de D_{KS}				$ F(O) - F(t) _{\max}$ das componentes texturais	
	n.s.				λ_m	$c\lambda_m$
N_{DV}	0,2	0,1	0,05	0,01		
107	0,103	0,118	0,131	0,158	0,144	0,149

NDV é o número total de amostra da população observada; $|F(O) - F(t)|_{\max}$ é a diferença entre frequência acumulada observada e teórica máxima; DKS é o coeficiente de Kolmogorov-Smirnov para os respectivos níveis de significância (n.s.). $|F(O) - F(t)|_{\max} < DKS$, aceita a hipótese.

Tabela A 12. Teste de distribuição Kolmogorov – Smirnov das escalas características λ_m e $C\lambda_m$ do solo sob caatinga

	Valores de D_{KS}				$ F(O) - F(t) _{\max}$ das componentes texturais	
	n.s.				λ_m	$c\lambda_m$
N_{DV}	0,2	0,1	0,05	0,01		
64	0,132	0,150	0,167	0,201	0,083	0,381

NDV é o número total de amostra da população observada; $|F(O) - F(t)|_{\max}$ é a diferença entre frequência acumulada observada e teórica máxima; DKS é o coeficiente de Kolmogorov-Smirnov para os respectivos níveis de significância (n.s.). $|F(O) - F(t)|_{\max} < DKS$, aceita a hipótese.

Tabela A 13. Teste-F: Densidade do solo sob caatinga e sob pastagem

	Caatinga	Pastagem
Média	1,317	1,394
Variância	0,014	0,003
Observações	66	107
Gl	65	106
F	4,823	
P(F<=f) uni-caudal	4,291E-13	
F crítico uni-caudal	1,432	

Tabela A 14. Teste-F: Umidade inicial do solo sob caatinga e sob pastagem

	Pastagem	Caatinga
Média	0,008	0,006
Variância	2,691E-04	2.786E-05
Observações	107	66
Gl	106	65
F	9.658	
P(F<=f) uni-caudal	1.875E-18	
F crítico uni-caudal	1.459	

Tabela A 15. Teste-F: Umidade final do solo sob caatinga e sob pastagem

	Caatinga	Pastagem
Média	0,331	0,329
Variância	0.007	0.003
Observações	66	107
Gl	65	106
F	2.134	
P(F<=f) uni-caudal	2,543E-04	
F crítico uni-caudal	1.432	

Tabela A 16. Teste-F: Parâmetro m do solo sob caatinga e sob pastagem

	Caatinga	Pastagem
Média	0.121	0.128875571
Variância	0.0004	0.0001
Observações	66	107
Gl	65	106
F	2.735	
P(F<=f) uni-caudal	1.998E-06	
F crítico uni-caudal	1.432	

Tabela A 17. Teste-F: Parâmetro n do solo sob caatinga e sob pastagem

	Caatinga	Pastagem
Média	2,277	2.296323618
Variância	0.002	0.001
Observações	66	107
Gl	65	106
F	2,630	
P(F<=f) uni-caudal	4,660E-06	
F crítico uni-caudal	1,432	

Tabela A 18. Teste-F: Parâmetro η do solo sob caatinga e sob pastagem

	Caatinga	Pastagem
Média	10,446	9,822
Variância	1,920	0,473
Observações	66	107
Gl	65	106
F	4,060	
P(F<=f) uni-caudal	8,208E-11	
F crítico uni-caudal	1,432	

Tabela A 19. Teste-F: Parâmetro S do solo sob caatinga e sob pastagem

	Caatinga	Pastagem
Média	1,008	0,824
Variância	0,127	0,084
Observações	66	107
Gl	65	106
F	1,510	
P(F<=f) uni-caudal	0.029	
F crítico uni-caudal	1,432	

Tabela A 20. Teste-F: Parâmetro Ks do solo sob caatinga e sob pastagem

	Caatinga	Pastagem
Média	0,107	0,063
Variância	0,005	0,001
Observações	66	107
Gl	65	106
F	3,578	
P(F<=f) uni-caudal	2,810E-09	
F crítico uni-caudal	1,432	

Tabela A 21. Teste-F: Parâmetro hg do solo sob caatinga e sob pastagem

	Pastagem	Caatinga
Média	-22,298	-17,671
Variância	556,93	127,86
Observações	107	66
Gl	106	65
F	4,355	
P(F<=f) uni-caudal	9,994E-10	
F crítico uni-caudal	1,459	

Tabela A 22. Teste-F: Escala λm do solo sob caatinga e sob pastagem

	Pastagem	Caatinga
Média	0,560	0,515
Variância	0,125	0,043
Observações	107	66
Gl	106	65
F	2,894	
P(F<=f) uni-caudal	4,113E-06	
F crítico uni-caudal	1,459	

Tabela A 23 Teste-F: Escala $C\lambda m$ do solo sob caatinga e sob pastagem

	Pastagem	Caatinga
Média	36118.62433	2037.853046
Variância	1.06282E+11	34176253.13
Observações	107	66
Gl	106	65
F	3109.824852	
P(F<=f) uni-caudal	9.46773E-98	
F crítico uni-caudal	1.459606418	