



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

JACQUES CARVALHO RIBEIRO FILHO

**ESTUDO DA DINÂMICA DE FENDAS NO SOLO: ABORDAGEM MORFOLÓGICA
E MODELOS DE REPRESENTAÇÕES DE APRENDIZAGEM**

FORTALEZA

2022

JACQUES CARVALHO RIBEIRO FILHO

ESTUDO DA DINÂMICA DE FENDAS NO SOLO: ABORDAGEM MORFOLÓGICA E
MODELOS DE REPRESENTAÇÕES DE APRENDIZAGEM

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e conservação de bacias hidrográficas no semiárido

Orientadora: Prof^a. Ph.D Eunice Maia de Andrade.

Coorientadora: Prof^a Ph.D. Maria João Simas Guerreiro

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

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

R369e Ribeiro Filho, Jacques Carvalho.

Estudo da dinâmica de fendas no solo: abordagem morfológica e modelos de representações de aprendizagem / Jacques Carvalho Ribeiro Filho. – 2022.
78 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2022.

Orientação: Profa. Dra. Eunice Maia de Andrade.

Coorientação: Profa. Dra. Maria João Simas Guerreiro.

1. Vertissolo. 2. Expansão e contração. 3. Rede neural artificial. 4. Região semiárida. 5. Umedecimento e secagem. I. Título.

CDD 630

JACQUES CARVALHO RIBEIRO FILHO

ESTUDO DA DINÂMICA DE FENDAS NO SOLO: ABORDAGEM MORFOLÓGICA E
MODELOS DE REPRESENTAÇÕES DE APRENDIZAGEM

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e conservação de bacias hidrográficas no semiárido

Aprovada em: 09/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Ph.D. Eunice Maia de Andrade (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª Ph.D. Maria João Simas Guerreiro (Coorientadora)
Universidade Fernando Pessoa, Porto, Portugal

Prof. Dr. Fernando Bezerra Lopes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª Dra. Helba Araújo de Queiroz Palácio
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (Campus Iguatu)

Prof. Dr. Luís César de Aquino Lemos Filho
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Prof. Dr. Luís Clenio Jário Moreira
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (Campus Limoeiro do Norte)

A **Deus** pela oportunidade que me foi dada. Aos meus pais, Jacques Carvalho Ribeiro e Luduvina de Almeida Ribeiro por sempre me apoiarem nesta trajetória. Obrigado a minha família, aos meus amigos (as) e a todos (as) que me ajudaram nessa caminhada.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por iluminar o meu caminho e me abençoar com realizações diárias.

À Universidade Federal do Ceará e aos Departamentos de Engenharia Agrícola e Ciência do solo, pela formação acadêmica, espaços laboratoriais e oportunidade de concluir o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Iguatu, pela realização da pesquisa de campo.

À minha orientadora professora Ph.Dra. Eunice Maia de Andrade, por ter acreditado no meu potencial para realizar este trabalho e pela sua competência, ensinamentos, excelente orientação, confiança e amizade.

As coorientadoras deste trabalho Prof.^a Ph.Dra., Maria João Simas Guerreiro e Prof.^a Dra. Helba Araújo de Queiroz Palácio, pelo incentivo, amizade, confiança e ajuda na organização das informações, pelas grandes dicas e excelente orientação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela concessão de bolsas durante o período de estudo.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa Massa (Manejo de Água e Solo no Semiárido) Eunice, Fernando, Helba, José, Júlio, Júnior, Diego, Fredson, Gilberto, Arieli, Matheus, Makêison, Erich, Geovane, Daniel, Emanuel, Valeria, Nicole, Josafá, Ruth, Mayara, Janielly, Zidane e Léo Cássio pelo excelente convívio e apoio em campo.

Aos professores e colegas contemporâneos de disciplinas pelo aprendizado, convívio e amizade ao longo dessa caminhada.

Aos amigos de residência e de disciplina, José Brasil, Matheus Moura e Marcos Makêison, pela amizade e paciência o meu muito obrigado.

A todos, que de alguma forma contribuíram para minha formação, desde a infância até os dias de hoje. Deixo o meu muito OBRIGADO!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

RESUMO

A dinâmica não linear das fendas em solos expansivos torna sua tipificação um desafio, principalmente em condições de campo. Para preencher esta lacuna, o presente estudo fundamentou-se nos seguintes objetivos: (i) quantificar e analisar o processo de fendilhamentos em solo expansivo em região semiárida sob condições de campo durante a estação seca e chuvosa; (ii) quantificar o grau de desenvolvimento de fendas no solo com diferentes granulometrias e diferentes coberturas vegetais em uma bacia hidrográfica; (iii) estimar as características morfométricas de fendas: área, profundidade e volume e (iv) avaliar a predição de fendas a partir de dados ambientais. Inicialmente, monitorou-se o efeito da vegetação na formação de fendas no solo em parcelas de 1m² com e sem vegetação. Posteriormente, em seis parcelas sem cobertura vegetal, monitorou-se durante o período de julho de 2019 a junho de 2020, em uma bacia hidrográfica de 2.8 ha, as características morfométricas das fendas do solo (área, profundidade e volume) e os fatores ambientais (umidade do solo, pluviosidade, evapotranspiração potencial e balanço hídrico). A precipitação apresentou distribuição unimodal de dezembro a maio, após cinco meses sem precipitação. A vegetação apresentou influência nas conexões entre fendas quando comparado com o solo sem cobertura. As fendas no solo selaram superficialmente primeiro nas parcelas com predominância de areia ante duas condições: (a) umidade do solo era igual ou superior a 24%; (b) uma precipitação anual acumulada de 109 mm. Já as parcelas com maior teor de partículas finas (argila e silte) tiveram as fendas seladas nas seguintes condições: (a) umidade do solo igual ou superior a 31%; (b) precipitação acumulada na estação chuvosa acima de 222 mm. Após seladas, as fendas no solo ressurgem, para diferentes texturas no solo após uma redução de 4% na umidade do solo. As parcelas com solos de maior índice de plasticidade desenvolveram mais fendas com maior profundidade e volume. Os fatores ambientais (umidade do solo e evapotranspiração potencial acumulada de 1 a 10 dias) que apresentam alta correlação com as características morfométricas das fendas no solo, apresentaram bom desempenho na modelagem das características morfométricas de fendas no solo para as parcelas acima de 30% de argila após passarem por treinamento e aplicados em rede neurais. A maior dispersão dos valores modelados sobre o previsto para todas as características morfométricas foi em solos com teor de areia superior a 40%.

Palavras-chave: vertissolo; expansão e contração; rede neural artificial; região semiárida; umedecimento e secagem.

ABSTRACT

The non-linear dynamics of crack in expansive soils makes their typification a challenge, especially in field conditions. To fill this gap, the present study was based on the following objectives: (i) quantify and analyze the cracking process in expansive soil in a semi-arid region under field conditions during the dry and rainy season; (ii) quantify the degree of development of cracks in the soil with different granulometries and different vegetation cover in a hydrographic basin; (iii) estimate the morphometric characteristics of cracks: area, depth and volume and (iv) evaluate the prediction of cracks from environmental data. Initially, the effect of vegetation on the formation of cracks in the soil was monitored in 1m² plots with and without vegetation. Subsequently, in six plots without vegetation cover, the morphometric characteristics of soil cracks (area, depth and volume) and environmental factors were monitored during the period from July 2019 to June 2020, in a watershed of 2.8 ha. (soil moisture, rainfall, potential evapotranspiration and water balance). Precipitation presented a unimodal distribution from December to May, after five months without precipitation. The vegetation showed influence on the connections between cracks when compared to the bare soil. Soil cracks sealed superficially first in plots with predominance of sand under two conditions: (a) soil moisture was equal to or greater than 24%; (b) an accumulated annual precipitation of 109 mm. The plots with the highest content of fine particles (clay and silt) had the cracks sealed under the following conditions: (a) soil moisture equal to or greater than 31%; (b) accumulated precipitation in the wet season above 222 mm. Once sealed, the cracks in the soil resurface, for different soil textures after a 4% reduction in soil moisture. Plots with soils with a higher plasticity index developed more cracks with greater depth and volume. The environmental factors (soil moisture and accumulated potential evapotranspiration from 1 to 10 days) that present high correlation with the morphometric characteristics of the cracks in the soil, showed good performance in modeling the morphometric characteristics of cracks in the soil for the plots above 30% of clay after undergoing training and applied in neural networks. The greatest dispersion of modeled values over predicted values for all morphometric characteristics was found in soils with sand content greater than 40%.

Keywords: vertisol; swelling and shrinking; artificial neural network; semiarid region; wetting and drying

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Parcela com solo sem vegetação e parcelas de solo com vegetação.....	15
Figura 2	- Localização da área de estudo.....	21
Figura 3	- (a) corte rasteiro da vegetação, (b) medição das dimensões da parcela, (c) instalação da parcela e (d) posicionamento da câmera para coleta de imagens.....	23
Figura 4	- (a) Imagem fotográfica com inclinação de 30°; (b) correção em relação ao plano horizontal (c) imagem em escala cinza para identificação de fendas e (d) segmentação das fendas.....	24
Figura 5	- Variação da umidade do solo nos trechos baixo, médio e alto da microbacia.....	26
Figura 6	- Variação da densidade de fendas em solo sem e com cobertura vegetal, nos trechos baixo, médio e alto da microbacia.....	27
Figura 7	- Modelo de regressão de fendas no solo entre D_c e $AWMARP$	28
Figura 8	- Modelo de regressão de fendas no solo entre as características: D_c e r	29
Figura 9	- Modelo de regressão de fendas no solo entre as características: D_c e $AWMFRAC$	30
Figura 10	- Localização da área de estudo.....	35
Figura 11	- Médias históricas no período de 1980 a 2020 da evapotranspiração potencial(mm), chuva (mm), temperaturas mínimas, máximas, médias (°C) e número médio de dias secos (NDS) para estação úmida e estação seca na área de estudo.....	36
Figura 12	- Identificação de fendas no solo nas parcelas experimentais durante a estação seca e úmida.....	37
Figura 13	- Fluxograma da metodologia de reconhecimento e quantificação de fendas: (a) pré-processamento, (b) segmentação de imagem, (c) morfologia operações, e (d) cálculo de parâmetros. Ao lado é possível observar o passo a passo do processamento da imagem.....	38

Figura 14	- Grid para leitura de profundidade: (a) inserção de haste nas fendas; (b) medição de haste para determinar a profundidade.....	39
Figura 15	- Variação da profundidade de fendas, umidade do solo e chuva durante o período de estudo.....	42
Figura 16	- Variação da Dc de fendas, umidade do solo e chuva durante o período de estudo.....	43
Figura 17	- Variação do volume de fendas umidade do solo e chuva durante o período de estudo.....	44
Figura 18	- Comparação das características morfométricas das parcelas (a) profundidade das fendas; (b) Dc e (c) volume de fendas.....	45
Figura 19	- Variação DC e variabilidade da umidade do solo ao longo do período - fases de expansão e contração.....	46
Figura 20	- Localização da área experimental no município de Iguatu-Ceará, Nordeste do Brasil.....	55
Figura 21	- a) Posicionamento da câmera para coleta de imagens; (b) grade com pontos equidistantes para leituras de profundidade; (c) haste para leitura da profundidade das fendas; (d) imagem fotográfica sem correção horizontal; (e) imagem corrigida para o plano horizontal.....	57
Figura 22	- Esquematização do modelo multicamada de rede neural.....	59
Figura 23	- Características descritivas morfométricas de fendas no Vertissolo estudado - área, profundidade e volume.....	60
Figura 24	- Características morfométricas de fendas na Parcela 1: área, profundidade e volume - observadas e modeladas.....	64
Figura 25	- Características morfométricas de fendas na Parcela 2: área, profundidade e volume - observadas e modeladas.....	65
Figura 26	- Características morfométricas de fendas na Parcela 3: área, profundidade e volume - observadas e modeladas.....	66
Figura 27	- Características morfométricas de fendas na Parcela 4: área, profundidade e volume - observadas e modeladas.....	67
Figura 28	- Características morfométricas de fendas na Parcela 5: área, profundidade e volume - observadas e modeladas.....	68
Figura 29	- Características morfométricas de fendas na Parcela 6: área, profundidade e volume – observadas e modeladas.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	-	Características gerais de propriedades solo nos diferentes trechos da microbacia.....	22
Tabela 2	-	Características físicas do solo.....	40
Tabela 3	-	Níveis de desenvolvimento de fendas no solo.....	40
Tabela 4	-	Características químicas das parcelas experimentais.....	51
Tabela 5		Precipitação diária durante o período de estudo.....	51
Tabela 6	-	Características físicas do solo.....	56
Tabela 7	-	Variáveis de entrada e saída para o modelo análise de rede neural.....	58
Tabela 8	-	Desempenho dos modelos para determinação de características morfométricas.....	61
Tabela 9	-	Correlação entre características ambientais externas e características morfométricas de fendas.....	71

LISTA DE SIGLAS

At	Área total
Ac	Área de fendas
AWMFRAC	Razão entre a média ponderada da área de dimensão fractal de fendas e o perímetro
AWMARP	AWMARP Média ponderada da área de fendas e o perímetro
CIAS	CIAS <i>Crack Image Analysis System</i> (Sistema de Análise de Imagem de Fendas)
CIF	Fator de Intensidade de fendas
Dc	Densidade de fendas
GIMP	<i>Image Manipulation Program</i> (Programa de Manipulação de Imagens)
RNA	Rede Neural Artificial
NDS	Número de dias secos
NS	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
PBIAS	Viés de porcentagem
PET	Evapotranspição potencial média
PPT	Precipitação média
Tmax	Temperatura máxima
Tmed	Temperatura média
Tmin	Temperatura mínima
US	Umidade do solo
WB	Balanço hídrico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	13
2	CONSIDERAÇÕES METODOLOGICAS.....	15
3	HIPÓTESES.....	16
4	OBJETIVOS.....	16
4.1	Geral.....	16
4.2	Específicos.....	16
5	ESTRUTURAÇÃO DA TESE.....	17
6	CAPÍTULO 1 – CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE FENDAS EM SOLO SEM E COM COBERTURA VEGETAL.....	18
6.1	Introdução.....	20
6.2	Material e métodos.....	21
6.2.1	<i>Área de estudo</i>	21
6.2.2	<i>Quantificação de fendas no solo</i>	24
6.3	Resultados e discussão.....	25
6.4	Conclusões.....	31
7	CAPÍTULO 2 – CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS E DESENVOLVIMENTO DE FENDAS NO SOLO EM CONDIÇÕES DE CAMPO EM CLIMA SEMIÁRIDO.....	32
7.1	Introdução.....	34
7.2	Material e métodos.....	35
7.2.1	<i>Área de estudo</i>	35
7.2.2	<i>Morfologia das fendas</i>	36
7.2.3	<i>Propriedades do solo</i>	39
7.2.4	<i>Análises estatísticas</i>	40
7.3	Resultados.....	41
7.4	Discussões.....	47
7.5	Conclusões.....	49
8	CAPÍTULO 3 – USO DE DADOS CLIMÁTICOS PARA PREVER A GEOMETRIA DE FENDAS EM SOLOS EXPANSIVOS.....	52
8.1	Introdução.....	54
8.2	Material e métodos.....	55
8.2.1	<i>Área de estudo</i>	55

8.2.2	<i>Aquisição de dados</i>	56
8.2.3	<i>Rede neural artificial</i>	58
8.2.4	<i>Análise de desempenho dos modelos</i>	59
8.3	Resultados e discussões	59
8.3.1	<i>Variabilidade espacial e temporal das características morfométricas das fendas</i>	59
8.3.2	<i>Performance dos Modelos</i>	61
8.3.3	<i>Características morfométricas das fendas do solo</i>	63
8.4	Conclusões	70
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO GERAL

O solo é um ecossistema complexo que desempenha um papel fundamental na produção agrícola, serviços ecossistêmicos e desenvolvimento humano (He *et al.*, 2021). As mudanças climáticas globais têm impulsionado a ocorrência mais frequente de períodos extremos de seca em muitas regiões, onde os solos experimentam uma quantidade significativa de perda de água e uma considerável redução volumosa sob tais condições, desencadeando a formação e propagação de fendas pela secagem (Decarlo; Shokri, 2014; Tang *et al.*, 2021). Essa característica se torna mais evidente em solos Vérticos com teores de partículas finas elevadas ou a presença de argilas expansivas.

A abrangência dos Vertissolos no mundo, corresponde aproximadamente 2,4% ($3,35 \times 10^8$ hectares). No Brasil ocupam cerca de $4,5 \times 10^6$ ha e estão presentes em todas as regiões (Benedetti *et al.*, 2008). A área estimada global pode ser superior, porém devido ao desconhecimento, e a questões de escala, sua dimensão, torna-se subestimada (Pal *et al.*, 2009). Da área global sob Vertissolos, 60% e 30% estão nos trópicos e subtropicais, respectivamente, e apenas 10% está em regiões mais frias (Dudal; Eswaran, 1988; Pal *et al.*, 2012).

Os Vertissolos são um recurso agrícola natural por apresentarem alto potencial produtivo, porém apresentam limitações físicas, principalmente o surgimento de fendas no solo após a contração de argilas e alta plasticidade após expansão das argilas. Minerais de argila (ilita, montmorilonita) são compostos de placas paralelas; as moléculas de água são atraídas por forças eletrostáticas de van derWaals de curto alcance e formam camadas ao longo das superfícies carregadas negativamente das estruturas semelhantes a placas. (Richards *et al.*, 1983).

Ligações eletrostáticas entre moléculas polares de água e superfícies de placas carregadas negativamente aumentam a distância interna entre placas paralelas, e o solo aumenta seu volume – ele expande (Kutílek; Nielsen 1994). Os compostos orgânicos em solos orgânicos também incham. O processo oposto ao inchaço é o encolhimento; durante o encolhimento, o volume do solo diminui com a diminuição do teor de água no solo. A retração do solo está associada à criação de f no solo e à diminuição do nível da superfície do solo. O aumento do conteúdo de água no solo é seguido pelo inchaço do solo à medida que as rachaduras se fecham e o nível da superfície do solo aumenta.

As fendas modificam os processos de infiltração, escoamento, evapotranspiração e redistribuição da água no perfil do solo (Tang., *et al.*, 2011a; Santos *et al.*, 2016; Sadeghi; Kheirfam; Zarei Darki, 2020), formando canais de fluxo preferenciais que transportam água e

nutrientes (solutos) mais rapidamente e afetam negativamente a irrigação e a fertilização do solo para uso agrícola (Bordoloi; Ni; Ng., 2020; Ralaizafisolariovony *et al.*, 2020). A formação de fendas nos solos geralmente possui estruturas de rede complexas, resultantes da resposta dos argilominerais do solo às condições de secagem. A caracterização quantitativa da morfologia das fendas melhora a compreensão fundamental do mecanismo subjacente dos processos de secagem do solo. Wopereis *et al.* (1994) realizaram pela primeira vez uma análise de morfologia de fendas e apontaram a forte dependência da morfologia das fendas com a extensão dos sistemas radiculares das plantas e o movimento da umidade do solo. Velde (1999) usaram o tamanho, a conectividade e as características geométricas da rede de fendas no solo para prever o futuro fenômeno de rachaduras no solo submetido a ciclos úmidos e secos.

As variáveis climáticas desempenham um papel controlador na formação e propagação de rachaduras de dessecação nos solos. Vários estudos têm examinado os efeitos de fatores climáticos (Tang *et al.*, 2011b; Lu *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018; Salimi *et al.*, 2021) para uma melhor compreensão do processo de surgimento e selagem de fendas no solo, e explorando as interações entre fatores ambientais e as características morfométricas das fendas no solo.

Além do conhecimento das relações entre chuva, umidade do solo e processo de fendilhamento, faz-se necessário técnicas que possibilitem gerar cenários futuros baseado em possíveis fatores ambientais e suas modificações dentro dos processos não lineares. Os modelos elaborados em redes neurais artificiais surgem como saída, pois se baseiam em treinamentos em bancos de dados já existentes e estimam cenários com baixo custo para gestores.

Em geral, os insights deste estudo são úteis para entender como ocorre o comportamento do fendilhamento em condições de campo e submetido a condições naturais e como são afetados espaço-temporalmente por variáveis ambientais; testar e aplicar variáveis ambientais em modelos de rede neural artificial para estimar as características morfométricas das fendas no solo. Por fim, os resultados servirão de base para futuras investigações de como as fendas no solo afetam os processos hidrológicos como escoamento superficial e produção de sedimentos e de como impulsionar o uso agrícola de solos verticos e suas limitações físicas.

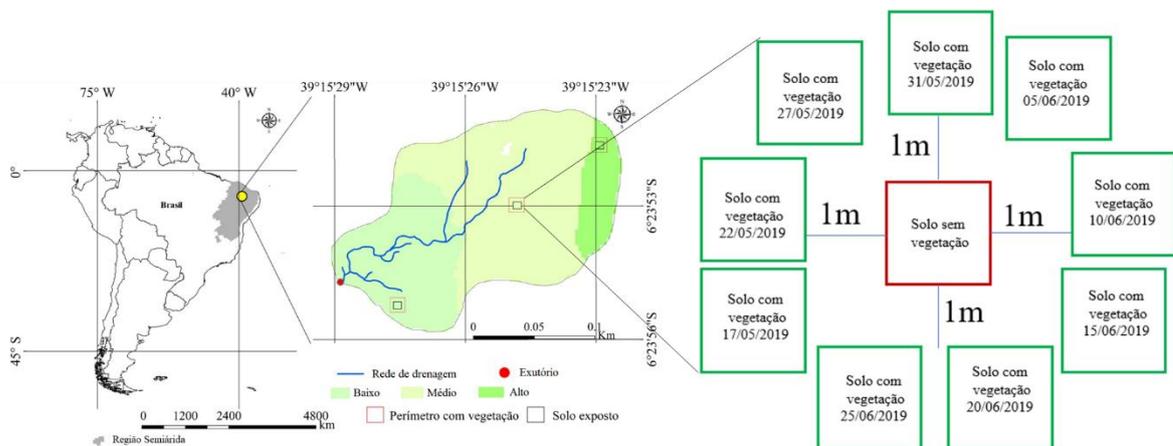
2 CONSIDERAÇÕES METODOLÓGICAS

O estudo foi realizado em uma microbacia de primeira ordem com área de 2,8 ha, localizada em fragmento de floresta tropical, sazonalmente seca, em regeneração há mais de 10 anos, após desmatamento, queima e plantio de pastagem em 2010 no Nordeste do Brasil.

O experimento foi subdividido em duas etapas. A primeira etapa do experimento foi realizada durante 38 dias entre os dias 17/05/2019 e 25/06/2019. Período esse que corresponde a maior produção de biomassa da vegetação do local.

Inicialmente, determinou-se os trechos alto, médio e baixo da microbacia (Figura 1), e posteriormente para cada trecho removeu-se a vegetação de uma parcela (1m x 1m) e adotou-se o tratamento de parcela sem vegetação. A cada nova coleta, registrava-se as fendas da parcela sem vegetação (1m x 1m) e abria-se uma nova parcela para verificar a formação de fendas sob a vegetação com intervalo de 5 dias entre as coletas (Figura 1).

Figura 1 – Parcela com solo sem vegetação e parcelas de solo com vegetação



Fonte: Próprio autor.

Após analisar o efeito da vegetação na formação de fendas no solo, iniciou-se a segunda etapa do experimento no qual fixou-se seis parcelas fixas (1m x 1m), sem cobertura para determinação da dinâmica espacial e temporal das fendas no solo.

Embora existam diversos métodos para determinação de fendas no solo, optou-se por uma análise não destrutiva do solo, no qual utilizou-se imagens fotográficas para determinação de área de fendas. Para determinação de volume de fendas, considerou-se o formato retangular no qual multiplicou-se a área da fenda por sua profundidade medida em diferentes secções intercaladas a cada 5 cm.

3 HIPÓTESES

O processo de fendilhamentos em condições naturais é predominantemente controlado pelas características intrínsecas do solo.

A variabilidade temporal da morfometria das fendas é controlada pelas características ambientais (chuva, evapotranspiração potencial e umidade do solo) as quais estão submetidas.

Modelos de treinamento artificial são capazes de predizer as características morfométricas de fendas no solo.

4 OBJETIVOS

4.1 Geral

Determinar por meio de medições diretas, uso de imagens digitais e através de modelos, as características morfométricas das fendas no solo (área, profundidade e volume), e suas variações no tempo e espaço submetido a condições naturais de campo em uma bacia hidrográfica de clima semiárido.

4.2 Específicos

(i) Quantificar e analisar o processo de fendilhamentos em solo expansivo em região semiárida sob condições de campo durante a estação seca e chuvosa.

(ii) Quantificar o grau de desenvolvimento de fendas no solo com diferentes granulometrias e sob condições de vegetação e solo exposto em uma bacia hidrográfica;

(iii) Estimar as características morfométricas de fendas: área, profundidade e volume;

(iv) Avaliar a predição de fendas a partir de dados ambientais (chuva, evapotranspiração potencial e umidade do solo);

(v) Gerar um banco de dados que possibilite treinamentos de modelos baseados em rede neural artificial.

(vi) Propor modelos de rede neural artificial com base em dados climáticos na estimativa das características morfométricas de fendas no solo;

(vii) Gerar um banco de dados para a área em estudo, com informações sobre altura de chuva (mm), umidade do solo (%), evapotranspiração potencial (mm) e balanço hídrico (mm) e sua influência na abertura e fechamento de fendas, servindo de base para estudos futuros.

5 ESTRUTURAÇÃO DA TESE

A parte inicial é composta de uma introdução geral, considerações metodológicas, hipótese e objetivos do trabalho. A redação desta tese de doutorado é composta por três capítulos. No capítulo inicial cujo título é Características morfológica de fendas em solo sem e com cobertura vegetal, abordamos a influência da vegetação e topo sequência nas características superficiais de fendas no solo que correlacionam área e perímetro dentro de uma bacia hidrográfica nos desafios de estimar as fendas no solo.

O segundo capítulo intitulado: Características morfométricas e desenvolvimento de fendas no solo em condições de campo em clima semiárido, aborda as relações das características ambientais: chuva e umidade do solo com as características morfométricas de fendas no solo. Neste estudo, identificamos que as características intrínsecas regem a magnitude das características morfométricas das fendas no solo e que as condições ambientais controlam suas variações no tempo.

Após conhecer as relações entre os fatores ambientais e as características morfométricas das fendas, utilizou-se modelos baseados em redes neurais para que a partir das características ambientais houvesse a predição do comportamento das característica morfométricas de fendas no solo, gerando assim o segundo capítulo intitulado: Uso de dados climáticos para prever a geometria de fendas em solos expansivos. Nesse estudo, dois modelos foram gerados e obtiveram desempenho satisfatório para estimar as características morfométricas de fendas no solo para solos com teor de argila acima de 30%.

6 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICA DE FENDAS EM SOLO SEM E COM COBERTURA VEGETAL

Resumo: A compreensão assertiva das fendas em solos expansivos torna sua tipificação um desafio, especialmente em condições de campo. Buscando superar essa dificuldade, utilizou-se imagens fotográficas digitais para estimar a geometria fractal de fendas superficial em solo sem e com vegetação em ambiente semiárido. A investigação foi realizada em uma linha transversal ao longo do curso principal de uma microbacia de primeira ordem na região Centro Sul, Ceará. Para o estudo definiu-se duas condições: solo sem vegetação e com cobertura vegetal. Instalou-se parcelas experimentais de modo a representar a parte alta, média e baixa da microbacia, vegetada e não vegetada, com 1 m² de área e espaçadas de 1 m, entre si. As seguintes características morfométricas das fendas foram monitoradas e avaliadas: área, média ponderada entre a área de fendas e o perímetro, média ponderada da área de dimensão fractal de fendas, conectividade entre fendas e umidade do solo, durante 38 dias. No solo com e sem vegetação, a intensidade de fendas no solo teve correlação significativa ($p \leq 0,01$) com o perímetro, área fractal e conexão de fendas. A intensidade de fendas entre as parcelas com cobertura e sem cobertura do solo apresentou diferença significativa ($p \leq 0,01$), apenas na parte baixa da microbacia. Observa-se que o trecho médio, com maior teor de areia, diferiu estatisticamente do trecho baixo para a intensidade de fendas no solo. A vegetação apresentou influência na correlação entre a intensidade de fendas e conexão entre fendas, influenciando na morfologia no trecho mais arenoso.

Palavras-chave: processamento de imagens; semiárido; vertissolo.

¹ Artigo publicado no periódico Artigo publicado no periódico Agro@mbiente On-Line no dia 31/12/2022, v. 16, p 1-15, link de acesso: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v17i00.7394>

MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF CRACKS IN SOIL WITH AND WITHOUT VEGETATION COVER

Abstract: The assertive understanding of cracks in expansive soils makes their typing a challenge, especially in field conditions. Seeking to overcome this difficulty, digital images were used to estimate the fractal geometry of surface cracks in soil with and without vegetation in a semi-arid environment. The investigation was carried out in a transversal along the main course of a first order watershed in the Center South region, Ceará. For the study, two treatments were defined: soil without vegetation and with vegetation cover. Experimental plots were installed in order to represent the upper, middle and lower part of the watershed, vegetated and non-vegetated, with an area of 1 m² and spaced 2 m apart. The following morphometric characteristics of the cracks were monitored and evaluated: area, weighted average between the crack area and the perimeter, weighted average of the fractal dimension area of cracks, connectivity between cracks and soil moisture, for 38 days. In the soil with and without vegetation, the intensity of cracks in the soil had a significant correlation ($p \leq 0.01$) with the perimeter, fractal area and crack connection. The intensity of cracks between plots with and without soil cover showed a significant difference ($p \leq 0.01$), only in the lower part of the watershed. It is observed that the medium stretch, with higher sand content, differed statistically from the low stretch for the intensity of cracks in the soil. The vegetation showed an influence on the correlation between the intensity of cracks and the connection between cracks, influencing the morphology in the sandiest stretch.

Keywords: image processing; semiarid; vertisoil

6.1 Introdução

A expansão e contração dos Vertissolos é um dos atributos para sua classificação (Embrapa, 2013). A área global de solos expansivos cobre 335 Mha (Un, 2019), estando presente em mais de 80 países e comuns nos trópicos semiáridos (Tang *et al.*, 2021). As regiões com solos verticos se encontram entre as isoietas anuais de 500 mm e 1000 mm (Tang *et al.*, 2021). São solos com elevada fertilidade, tornando-se um recurso agrícola natural importante (Un, 2019). Apesar do potencial para contribuir com a produção de alimentos e energia, tem propensão a salinização devido à baixa drenagem natural.

O surgimento de fendas por secagem é um fenômeno comum em solos com argila 2: em virtude da perda de água do solo para o ambiente (Morris *et al.*, 1992; Wang *et al.*, 2018; Tang *et al.*, 2021). A formação e propagação de fendas por secagem na superfície envolvem fatores acoplados, como mecânica do solo não saturado, condições atmosféricas e características da vegetação (Bordoloi; Ni; Ng. 2020). Na literatura, estudos a nível de campo exploraram o mecanismo de secagem do solo considerando os efeitos acoplados da interação solo-ar-água-planta (Kisné *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2018; Tang *et al.*, 2021; Ribeiro Filho *et al.*, 2022).

A pesquisa sobre expansão e contração de fendas em solos verticos tem se concentrado em ambientes controlados com foco na quantificação da geometria de uma única fenda e na morfologia das redes de fendas (Xiong *et al.*, 2010; Bordoloi; Ni; Ng. 2020; Tang *et al.*, 2021). Além disso, estudos em escala de campo buscam compreender a dinâmica dos fendilhamentos por meio de observações visuais na superfície do solo (Xiong *et al.*, 2010; Tang *et al.*, 2021) e suas interações com o ambiente nos processos naturais hidrológicos (Santos *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018).

A maioria dos estudos realizados para caracterizar o processo de perda de umidade do solo enfoca, principalmente, a perspectiva da mecânica dos solos não saturados (Kishné *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2018; Ribeiro Filho *et al.*, 2022) e consideram apenas o solo descoberto (Bordoloi; Ni; Ng.2020). As informações relevantes disponíveis sobre a geometria irregular das fendas no solo são a nível de laboratório com estrutura do solo deformada (Bordoloi; Ni; Ng. 2020; Tang *et al.*, 2021). Compreender os processos de formação e expansão de fendas e as correlações com outras características morfológicas em condições de campo, ainda, é um desafio para otimizar seu uso e manejo (Kishé *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2018; Tang *et al.*, 2021; Ribeiro Filho *et al.*, 2022).

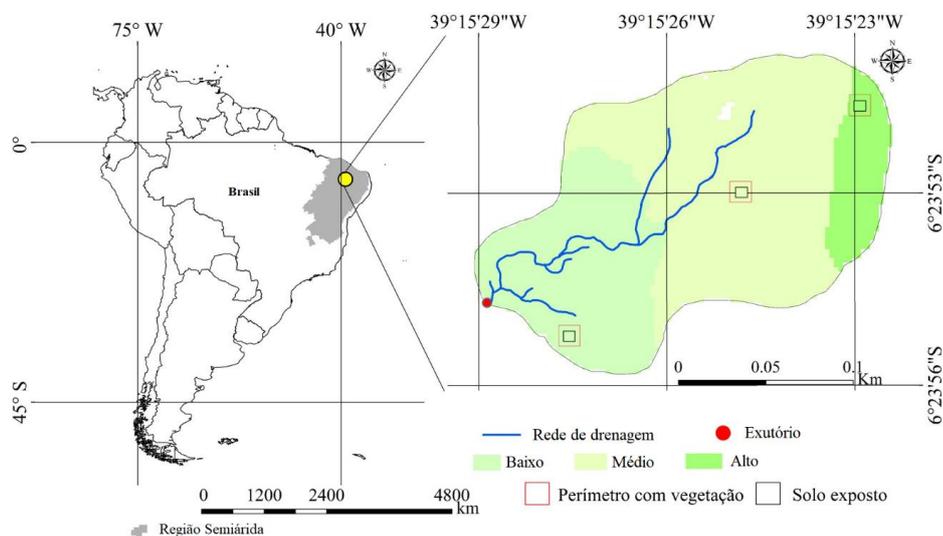
O conhecimento do padrão, dimensão e correlações da geometria irregular das fendas no solo é importante para estudar o fluxo de água em solos descobertos e vegetados (Baer *et al.*, 2009). As fendas de secagem em solos, geralmente, possuem estruturas de rede complexas, resultantes da resposta do tecido do solo às condições de perda de umidade. A caracterização quantitativa da morfologia das fendas melhora a compreensão fundamental do mecanismo subjacente aos processos de dessecação do solo (Tang *et al.*, 2021) e a resposta hidrológica. Diante o exposto, objetivou-se investigar a influência do topo sequênciã e da vegetação na geometria fractal de fendas superficiais extraídas por técnicas de processamento de imagens.

6.2 Material e métodos

6.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em uma microbacia de primeira ordem com área de 2,8 ha, localizada em fragmento de floresta tropical, sazonalmente seca, em regeneração há mais de 10 anos, após desmatamento, queima e plantio de pastagem em 2010 no Nordeste do Brasil (Figura 2). O clima da região é classificado como semiárido quente (BSh), com precipitação média histórica da região é de $996,9 \pm 300,1$ mm, com 89% concentrada no período de dezembro a maio (Campos; Andrade, 2021). A evapotranspiração potencial média de 2113 mm ano^{-1} com índice de aridez de 0.48 (Guerreiro *et al.*, 2013). O relevo da microbacia é suave ondulado e o solo é classificado como VERTISSOLO EBÂNICO Carbonato típico (Embrapa, 2013), com predominância de argila 2:1 do grupo da montmorilonita. As características físicas do solo de cada trecho da microbacia podem ser vistas na Tabela 1.

Figura 2 - Localização da área de estudo



Fonte: Próprio autor.

Tabela 1 - Características gerais de propriedades solo nos diferentes trechos da microbacia

Propriedades do solo	Trechos da microbacia		
	Baixo	Médio	Alto
Areia (%)	21	41	27
Silte (%)	43	33	41
Argila (%)	36	26	32
Limite de liquidez (%)	43	42	40
Limite de plasticidade (%)	14	32	26
Índice de Plasticidade	30	10	14

Fonte: Próprio autor.

O período de estudo foi de 38 dias, iniciando no dia 17/05/2019, após um evento de chuva de 42,5 mm. Nessa data todas as fendas atingiram o selamento e registrou-se escoamento superficial. As parcelas foram monitoradas até o dia 25/06/2019. Esse período foi selecionado por ser o período úmido da região e, conseqüentemente, época de maior cobertura vegetal (Ribeiro Filho *et al.*, 2016).

Na área se demarcou as parcelas, um total de seis, distribuídas na parte alta, média e baixa da microbacia, de modo pareadas. Em cada posição, uma parcela (1 m x 1 m) permaneceu com vegetação e outra teve sua cobertura retirada (dois tratamentos). Durante o monitoramento, imagens foram produzidas com câmera (Sony® - DSC-H9) nas parcelas de solo sem e com cobertura vegetal (Figura 3). Em ambas as parcelas, coletou-se três amostras simples de solo na camada 0 – 0,10, para determinação da umidade do solo pelo método gravimétrico.

Figura 3 - (a) corte rasteiro da vegetação, (b) medição das dimensões da parcela, (c) instalação da parcela e (d) posicionamento da câmera para coleta de imagens.

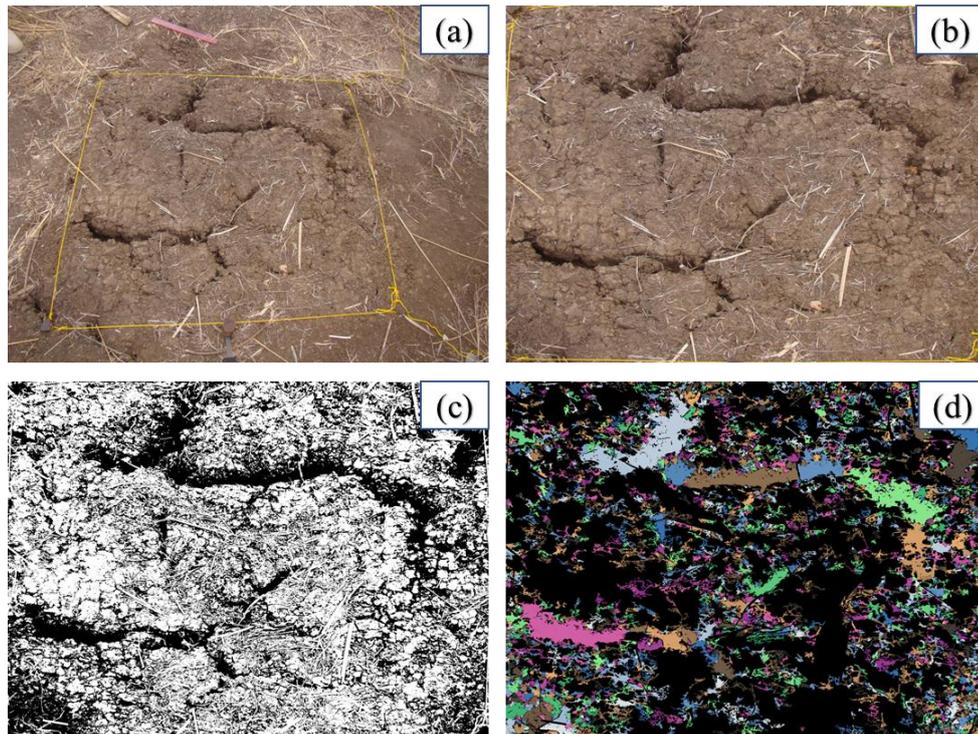


Fonte: Próprio autor.

Para estimar a morfologia das fendas, as imagens eram registradas a cada quatro dias, perfazendo nove imagens por parcela e um total de 54 imagens (9 imagens x 2 tratamentos x 3 posições na microbacia). Essas imagens foram obtidas com câmera instalada a 1,0 m de altura e inclinação de 30° (Figuras 4a) em relação à parcela experimental. Todas as imagens foram gravadas com uma configuração de câmera idêntica (Sony® - DSC-H9) com dimensões fixas de 3264 x 2448 píxeis e com função de melhor disparo, sem zoom (Bauer; Strauss, 2014). A área capturada em cada imagem foi de 1 m² (1 m x 1 m) e uma escala métrica foi utilizada como referência para medição das características das fendas do solo. As imagens foram corrigidas para um plano horizontal (Figura 4b) usando o software *GNU Image Manipulation Program* (GIMP) versão 2.10.10 (Disponível em: 06/03/2019 <https://www.gimp.org/>). Nas imagens corrigidas foram transformadas em escala cinza (Figura 4c) e segmentadas (Figura 4d) para analisar as seguintes variáveis: número de fendas, comprimento, largura, perímetro e área,

usando o software *Crack Image Analysis System* (CIAS) (Disponível em: 08/03/2019 <http://acei.cn/program/CIAS/>) (Liu *et al.*, 2013).

Figura 4 - (a) Imagem fotográfica com inclinação de 30°; (b) correção em relação ao plano horizontal (c) imagem em escala cinza para identificação de fendas e (d) segmentação das fendas.



Fonte: Próprio autor.

6.2.2 *Quantificação de fendas no solo*

De posse dos valores de área e perímetro de fendas no solo, quantificou-se a densidade de fendas no solo (D_c), conforme a Equação 1 (Kishné *et al.*, 2010).

$$D_c = \frac{a_c}{A_t} * 100 \quad \text{Equação 1}$$

Em que: a_c – área de fendas (m^2) e A_t – área total (m^2).

Posteriormente, determinou-se à razão entre a média ponderada da área de fendas e o perímetro (AWMARP), e a razão entre a média ponderada da área de dimensão fractal de fendas e o perímetro (AWMFRAC) empregando-se as Equações 2, 3 (Xiong *et al.*, 2008). A conectividade morfológica das fendas (r) foi estimada pela Equação 4 (Xiong *et al.*, 2010).

$$AWMAPR = \sum_{i=1}^m j = \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{a_{cij}}{P_{cij}} \right) \left(\frac{a_{cij}}{A_c} \right) \right] \quad \text{Equação 2}$$

Em que: a_c – área de fendas (m^2); P – perímetro de fenda no solo (m) e A_c – área total (m^2).

$$AWMFRAC = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{2 \ln(0,25 P_{cij})}{\ln(a_{cij})} \left(\frac{a_{cij}}{A_c} \right) \right] / N \quad \text{Equação 3}$$

Em que: a_c – área de fendas (m^2); P – perímetro de fenda no solo (m); A_c – área total (m^2) e N – número total de fendas.

$$r = \frac{L}{L_{max}} = \frac{L}{3(V-2)} \quad \text{Equação 4}$$

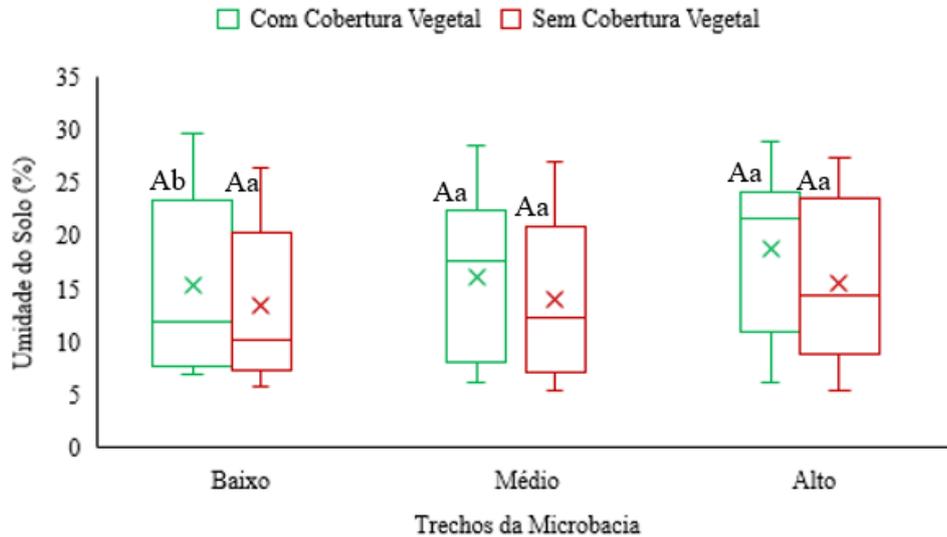
Em que: L - número de fendas conectadas; V é o número de vértice de fendas; L_{max} é o número máximo de fendas conectadas possíveis. O índice r varia entre 0 e 1. Quanto maior for o seu valor maior será a conectividade do fendas.

Realizou-se a estatística descritiva dos dados seguido pela aplicação do teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov. Como o conjunto de dados não apresentou normalidade, o efeito da vegetação nos parâmetros de fendas e os trechos da microbacia foram investigados por meio de análise de regressão e teste não paramétrico de Mann-Whitney ao nível de 1% de probabilidade.

6.3 Resultados e discussões

A umidade do solo não apresentou diferença significativa ($p \leq 0,01$) em relação aos trechos da microbacia (Figura 5), nos tratamentos. Com relação ao efeito cobertura, observa-se que na parte baixa da bacia ocorreu diferença significativa ($p \leq 0,01$) da umidade do solo. A cobertura vegetal rasteira (Figura 4a) contribuiu com uma maior rugosidade à superfície do solo (Aquino *et al.*, 2017), reduzindo a velocidade do fluxo de água, ampliando, assim, o tempo de oportunidade para a infiltração da água no solo (Fry, Guber, 2020; Sousa *et al.*, 2022). Acredita-se que a maior variabilidade da umidade entre tratamentos, na parte baixa da microbacia, seja decorrente do maior índice de plasticidade e maior teor de argila nessa parcela (Tabela 1).

Figura 5 - Variação da umidade do solo nos trechos baixo, médio e alto da microbacia em estudo em solo sem e com cobertura vegetal

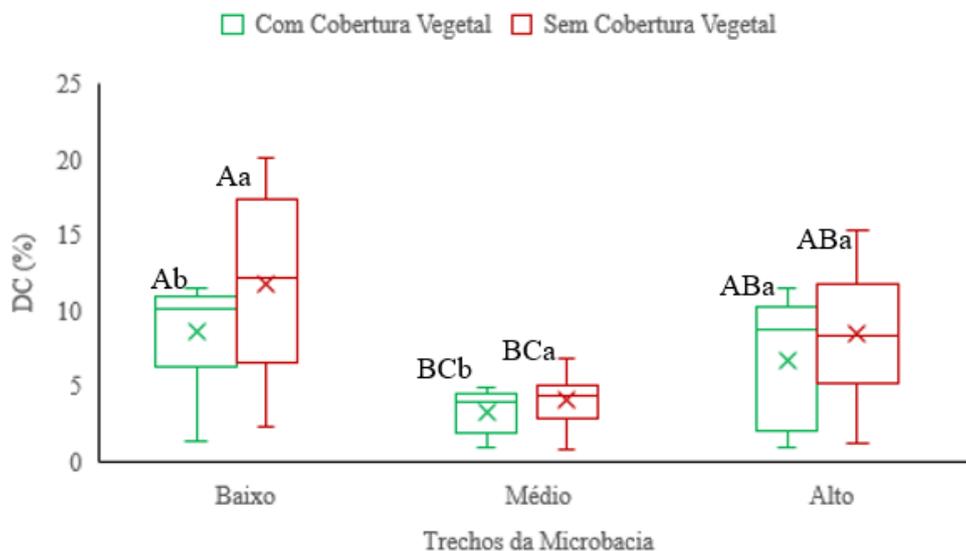


Fonte: Próprio autor.

*letras maiúsculas iguais, não diferem entre trechos da microbacia ($p \leq 0,01$ - Mann-Whitney); letras minúsculas iguais não diferem entre parcelas no mesmo trecho ($p \leq 0,01$ - Mann-Whitney).

A densidade de fendas no solo (Dc), apresentou diferença significativa ($p \leq 0,01$) entre solo sem e com cobertura nos trechos baixo e médio da microbacia (Figura 6), havendo maior densidade de fendas no solo sem vegetação. Estudos realizados por Bordoloi *et al.* (2020), evidenciaram redução do Dc em solos com vegetação para solos plásticos. Os menores valores da densidade de fendas no solo (Dc) ocorreu no trecho médio da microbacia (Figura 6), diferindo estatisticamente ($p \leq 0,01$) do trecho baixo que tem maior intensidade de fendas. A maior Dc ocorrida no trecho baixo da microbacia se explica pelo maior teor de argila e índice de plasticidade do solo (Tabela 1).

Figura 6 - Variação da densidade de fendas em solo sem e com cobertura vegetal, nos trechos baixo, médio e alto da microbacia.



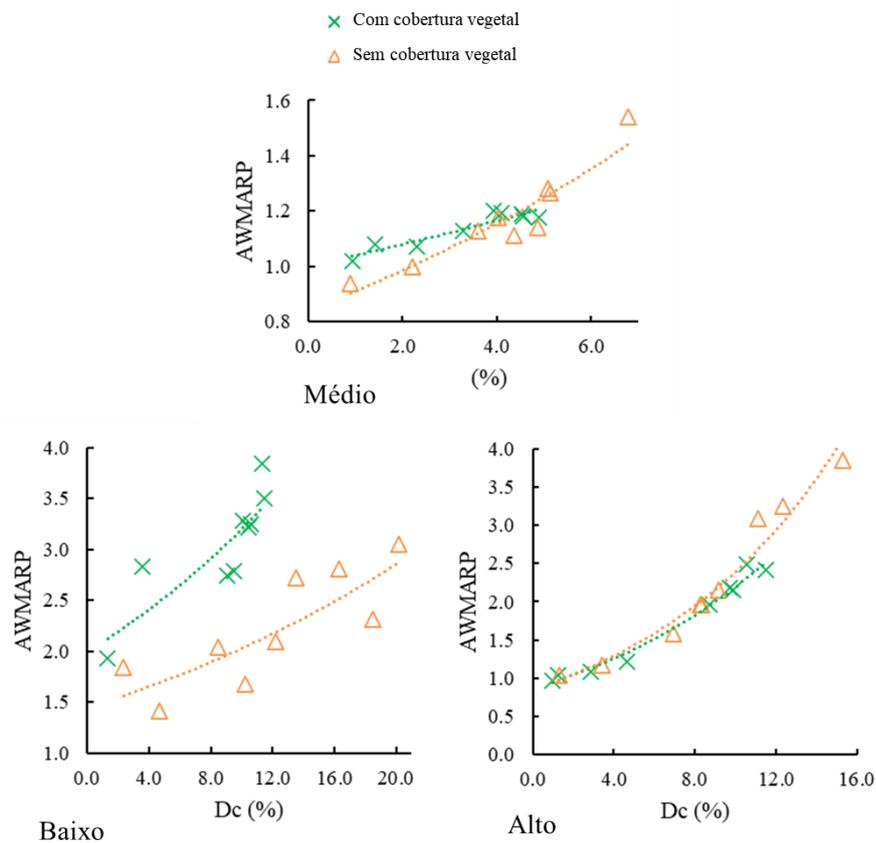
Fonte: Próprio autor.

*letras maiúsculas iguais, não diferem entre trechos da microbacia ($p \leq 0,01$ - Mann-Whitney); letras minúsculas iguais não diferem entre parcelas no mesmo trecho ($p \leq 0,01$ - Mann-Whitney).

Os maiores teores de argila e de limite de plasticidade influenciaram diretamente no processo de expansão e contração do solo sem cobertura vegetal no trecho baixo (Figura 6). O trecho médio apresenta maior teor de areia no solo, reduzindo a propagação de fendas (Tabela 1). Ribeiro Filho *et al.* (2022) modelando o Dc por fatores climáticos observaram que solos com teor de argila menor que 30%, reduz a formação de fendas no solo, influenciando diretamente no Dc. A diferença das Dc entre trechos da microbacia evidencia que as características do solo são preponderantes em relação ao efeito da vegetação na propagação de fendas no solo (Wang *et al.*, 2018).

Na parte baixa da microbacia (Figuras 7), onde se encontra os maiores teores de argila, argila e silte e índice de plasticidade (Tabela 1), a cobertura do solo se mostrou determinante na relação entre Dc e AWMARP e Dc e r. Identifica-se maior sensibilidade da AWMARP e r a pequenas variações do Dc. Já para as áreas com menor teor de argila e índice de plasticidade não se observa efeito da cobertura vegetal na resposta das relações investigadas (Figura 7).

Figura 7 - Modelo de regressão de fendas no solo entre Dc e AWMARP



Fonte: Próprio autor.

* Regressões com $p\text{-value} < 0,01$

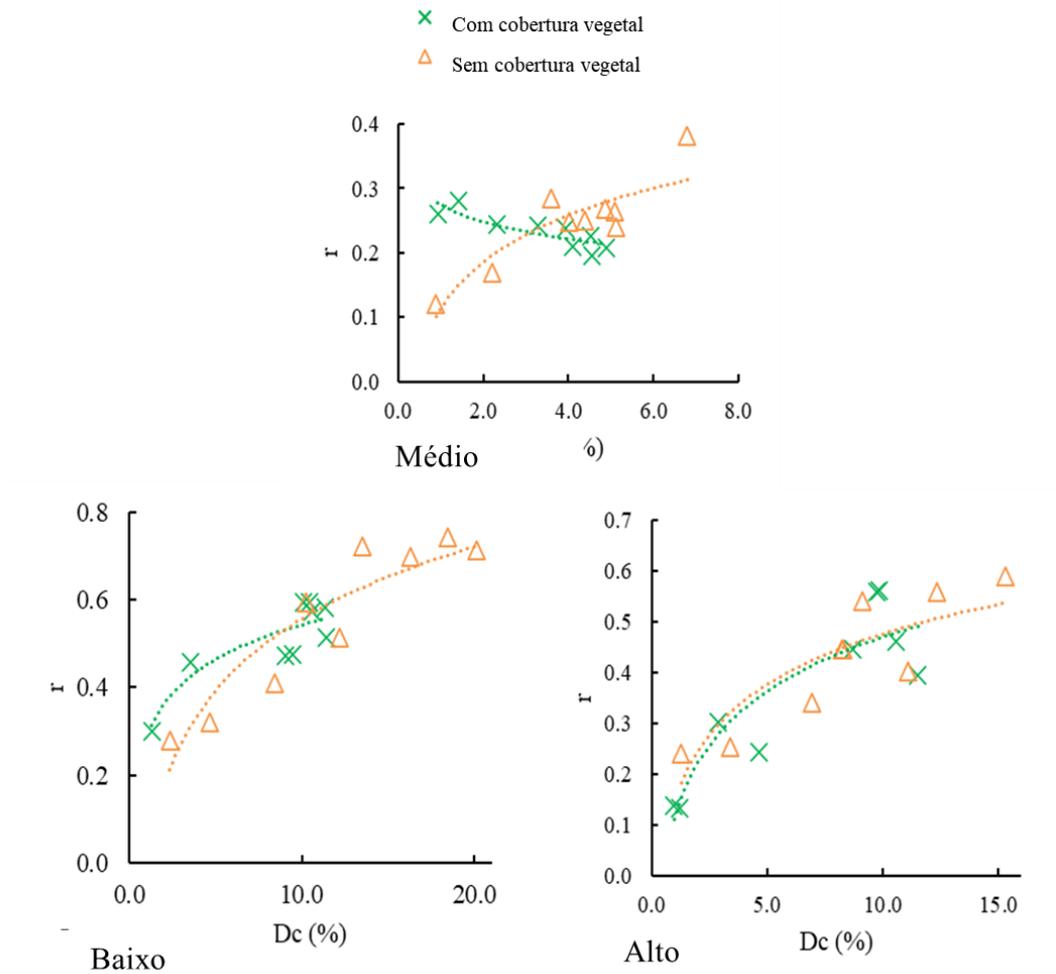
Baixo - × $Y = 1,9966e^{0,0472x}$ $R^2 = 0,72$; △ $Y = 1,4413e^{0,0342x}$ $R^2 = 0,6827$

Médio - × $Y = 1,0006e^{0,0382x}$ $R^2 = 0,876$; △ $Y = 0,8414e^{0,0792x}$ $R^2 = 0,8901$

Alto - × $Y = 0,8674e^{0,0928x}$ $R^2 = 0,9787$; △ $Y = 0,8564e^{0,1029x}$ $R^2 = 0,9571$

A Dc apresentou correlações positivas e significativas ($p \leq 0.01$) com a média ponderada, entre a área de fendas e o perímetro (AWMARP) e a conectividade morfológica das fendas (r) nas duas condições do solo, exceto trecho médio (Figuras 7 e 8).

Figura 8 - Modelo de regressão de fendas no solo entre as características: Dc x r



Fonte: Próprio autor.

*Regressões com $p\text{-value} < 0,01$

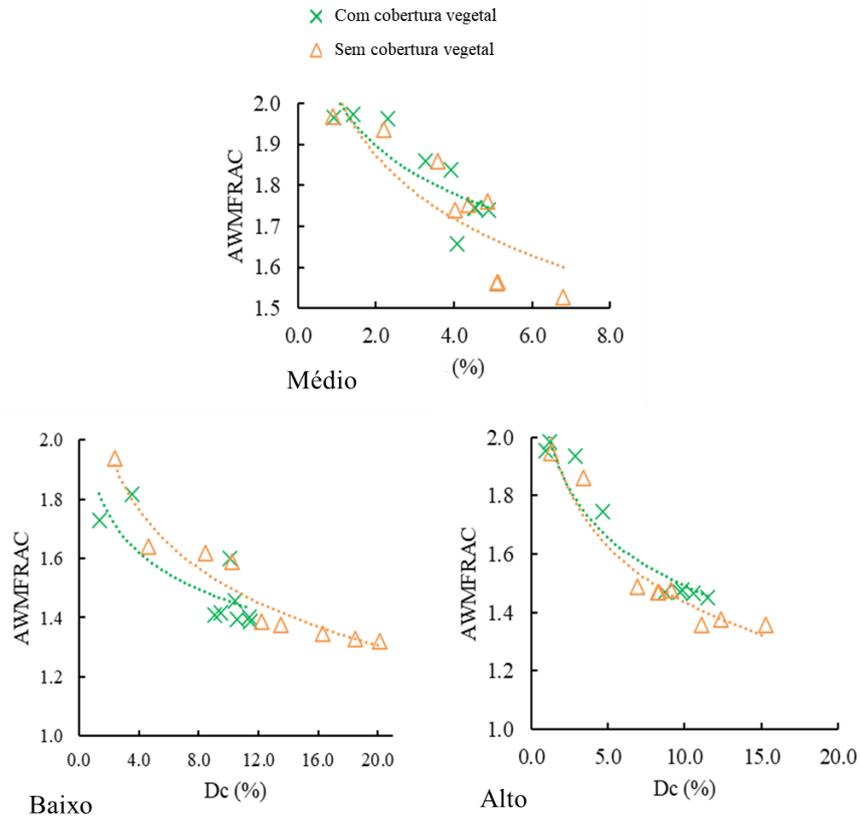
Baixo - $\times Y = 0,1139\ln(x) + 0,2804 R^2 = 0,7699$; $\triangle Y = 0,2376\ln(x) + 0,009 R^2 = 0,8504$

Médio - $\times Y = -0,038\ln(x) + 0,2749 R^2 = 0,6977$; $\triangle Y = 0,1045\ln(x) + 0,1133 R^2 = 0,7648$

Alto - $\times Y = 0,1543\ln(x) + 0,1151 R^2 = 0,8118$; $\triangle Y = 0,1436\ln(x) + 0,1460 R^2 = 0,736$

A correlação entre Dc e média ponderada da área de dimensão fractal de fendas (AWMFRAC) foi inversa e significativa ($p \leq 0,01$) nos trechos da microbacia e nas duas condições do solo (Figura 9).

Figura 9 - Modelo de regressão de fendas no solo entre as características: Dc x AWMFRAC



*Regressões com p -value < 0,01

Baixo - \times $Y = -0,18\ln(x) + 1,8695$ $R^2 = 0,6597$; \triangle $Y = -0,285\ln(x) + 2,1588$ $R^2 = 0,9242$

Médio - \times $Y = -0,169\ln(x) + 2,0136$ $R^2 = 0,714$; \triangle $Y = -0,222\ln(x) + 2,027$ $R^2 = 0,6973$

Alto - \times $Y = -0,239\ln(x) + 0,20416$ $R^2 = 0,9141$; \triangle $Y = -0,275\ln(x) + 2,0678$ $R^2 = 0,9303$

Tais relações evidenciam que o surgimento de fendas no solo, originalmente intacto, geram a formação de polígonos que diminui a força motriz da fenda (XIONG *et al.*, 2010; Shit; Bhunia; Maiti, 2015). Essa menor resistência decorrente da tração em um único torrão, supera a força de penetração da raiz e interrompe a geração de novas fendas e novos torrões (Bordoloi; Ni; Ng. 2020).

Com o aumento da densidade de fendas, ocorre modificação de forma e maior dispersão na correlação de Dc e AWMARP (Figura 7), modificando a conectividade morfológica das fendas (r) (Figura 8) e reduzindo a área fractal (Figura 9). Com isto, ocorre o surgimento de fendas finas que aumentam a conectividade entre fendas desenvolvimento fraco para desenvolvimento extremamente intensivo (Xiong *et al.*, 2010). Observa-se ainda que para o trecho médio a conectividade entre fendas (r) (Figura 8), apresenta correlação negativa para o solo com cobertura vegetal, associada a maior teor de areia e menores valores de Dc.

6.4 Conclusões

O comportamento mecânico do solo fissurado ocorreu de forma diferente entre os trechos da microbacia, com menor intensidade de fendas para o trecho intermediário com maior teor de areia. A vegetação não influenciou no D_c , AWMARP e AWMFRAC, apresentando influencia apenas na conexão entre fendas (r), no trecho mais arenoso da microbacia. Em solos com maior teor de argila, a cobertura vegetal promoveu uma maior sensibilidade do solo na relação densidade de fendas x AWMARP.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e à Fundação Estadual de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) do Ceará pelo seu apoio financeiro para esta pesquisa.

7 CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS E DESENVOLVIMENTO DE FENDAS NO SOLO EM CONDIÇÕES DE CAMPO EM CLIMA SEMIÁRIDO

Resumo: As propriedades físicas e hidrológicas do solo são importantes para a modelagem, planejamento e gestão adequados dos recursos hídricos e conservação do solo. Em áreas de solos verticos submetidas a ciclos de umedecimento e secagem, a interação solo-água-atmosfera é complexa e pouco estudada em escala de campo, principalmente em regiões tropicais secas onde predomina o processo de fendilamentos. Este trabalho quantifica e analisa o desenvolvimento de fendas em condições de campo em um solo expansivo em uma região semiárida para as estações seca e chuvosa. Seis parcelas de 1m² em uma bacia experimental de 2,8 ha foram fotografadas e medidas diretas de umidade do solo e área de rachaduras, profundidade e volume uma vez por semana e após um evento de chuva de julho/2019 a junho/2020. A precipitação foi monitorada durante todo o período e apresentou distribuição unimodal de dezembro a maio, após cinco meses sem precipitação. As rachaduras selaram primeiramente nas parcelas com predominância de areia, e quando a umidade do solo estava acima de 24%, e tiveram uma precipitação acumulada de 109 mm. As demais parcelas vedaram suas rachaduras quando a umidade do solo estava acima de 31% e com precipitação acumulada na estação chuvosa acima de 222 mm. As rachaduras são reconstruídas após a selagem com uma redução de 4% na umidade do solo. A profundidade das fissuras apresentou melhor resposta às variações climáticas (precipitação total, umidade do solo e dias secos e úmidos contínuos). O teor de argilas e as parcelas de maior índice de plasticidade desenvolveram mais trincas com maior profundidade e volume.

Palavras-chave: Solos verticos; regiões tropicais secas; semiárido; umedecimento e secagem

² Artigo publicado no periódico Hydrology no dia 04/04/2023, v. 10, nº 4, p 1-16, link de acesso: <https://doi.org/10.3390/hydrology10040083>

SOIL CRACKS MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS AND DEVELOPMENT UNDER FIELD CONDITIONS IN A SEMIARID CLIMATE

Abstract: Soil physical and hydrological properties are important for proper modelling, planning, and management of water resources and soil conservation. In areas of Vertic soils submitted to wetting and drying cycles, the soil-water-atmosphere interaction is complex and understudied at the field scale, especially in dry tropical regions where the cracking process predominates. This work quantifies and analyzes cracks' development under field conditions in an expansive soil in a semiarid region for both the dry and rainy seasons. Six plots of 1m² in an experimental 2.8 ha watershed were photographed and direct measurements taken for soil moisture and crack area, depth and volume once a week and after a rainfall event from July/2019 to June/2020. Rainfall was monitored for the entire period, and showed a unimodal distribution from December to May, after five months without precipitation. The cracks first sealed in the plots with a predominance of sand, and when the soil moisture was above 24%, and had an accumulated precipitation of 109 mm. The other plots sealed its cracks when soil moisture was above 31% and with an accumulated precipitation in the rainy season above 222 mm. Cracks redeveloped after sealing upon a reduction of 4% in soil moisture. The depth of cracks showed a better response to climatic variations (total precipitation, soil moisture and continuous dry and wet days). The clays content and the higher plasticity indexes plots developed more cracks with greater depth and volume.

Keywords: Vertic soils; soil cracks; tropical dry regions; semiarid; wetting and drying

7.1 Introdução

Ecossistemas áridos e semiáridos cobrem aproximadamente 29,8% da superfície da Terra (Wang *et al.*, 2014). Prevê-se que o aquecimento global e as mudanças climáticas associadas, aumentem o risco de fenômenos extremos - secas e chuvas intensas, que afetam diretamente os processos hidrológicos (Wang *et al.*, 2014; Tang *et al.*, 2021). As previsões de regimes climáticos mais extremos tornarão os ecossistemas áridos e semiáridos mais vulneráveis, com possibilidade de aumento da área total das terras secas a nível global (Dai, 2013).

Os processos hidrológicos de escoamento, infiltração e evapotranspiração estão diretamente associados aos solos (Sadeghi; Kheirfam; Zarei Darki, 2020; Cheng *et al.*, 2021; Tang *et al.*, 2021), sendo essencial conhecer suas características físicas, químicas e biológicas durante os processos de umedecimento e secagem (Santos *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018; Bordoloi; Ni; Ng, 2020; Sadeghi; Kheirfam; Zarei Darki, 2020; Cheng *et al.*, 2021). Em solos compostos por argilas expansivas (montmorilonita por exemplo), o processo de umedecimento e secagem resulta na contração (quando seco) e expansão (quando úmido) das argilas expansivas (Tang *et al.*, 2018; 2021).

Alterações no teor de água em solos expansivos podem alterar significativamente o comportamento hidromecânico de um solo. Esses efeitos incluem principalmente: (1) mudança volumosa, como inchaço e encolhimento, e (2) variação do comportamento mecânico, como força e compressão (Xu *et al.*, 2022). O caráter expansível desses solos tem implicações nos mais distintos campos, como por exemplo na área da engenharia geotécnica, aonde a formação de redes de fendas pode destruir a integridade da estrutura do solo, danificando estradas e outras infraestruturas de construção civil (Al-Jeznawi *et al.*, 2021; Cheng *et al.*, 2021). As fendas modificam os processos de infiltração, escoamento, evapotranspiração e redistribuição da água no perfil do solo (Tang *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2016; Sadeghi; Kheirfam; Zarei Darki, 2020), formam canais de fluxo preferenciais que transportam água e nutrientes (solutos) mais rapidamente e afetam negativamente a irrigação e a fertilização do solo para uso agrícola (Bordoloi; Ni; Ng., 2020; Ralaizafisolariovony *et al.*, 2020).

A pesquisa sobre expansão e contração de fendas em solos expansivos tem se concentrado em ambientes controlados com foco na quantificação da geometria de uma única fenda e na morfologia das redes de fendas (Xiong *et al.*, 2010; Dinka *et al.*, 2013; Bordoloi; Ni; Ng., 2020; Tang *et al.*, 2021). Além disso, estudos em escala de campo buscam compreender a dinâmica dos fendilhamentos por meio de observações visuais na superfície do solo (Xiong *et*

al., 2010; Tang *et al.*, 2018; 2021). A quantificação das alterações das propriedades hidráulicas de solos expansivos em condição de campo, permitirá correlacionar dinâmicas entre clima e características dos fendilhamentos à escala temporal (Bordoloi; Ni; Ng., 2020; Tang *et al.*, 2021).

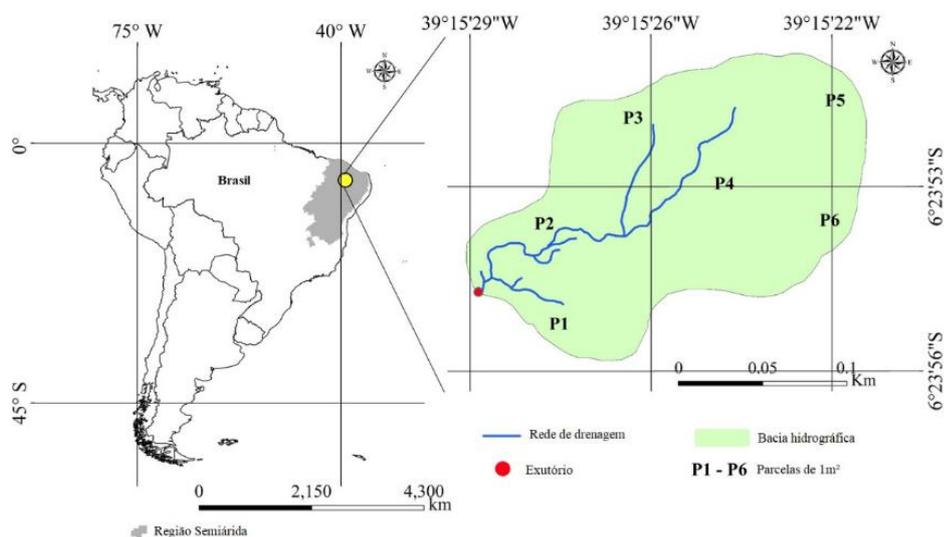
Fendas no solo induzidas pela seca são geralmente estruturas complexas de rede. A aquisição precisa das redes de fendas do solo não é apenas um pré-requisito para a obtenção dos parâmetros geométricos relevantes das redes de fendas, mas também uma base significativa para estudar melhor o mecanismo de desenvolvimento e medidas de prevenção da rachadura do solo (Wei *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2022). Dada a escassez de estudos realizados em condições naturais de campo, este trabalho tem como objetivo quantificar e analisar o processo de fendilhamentos em solo expansivo em região semiárida sob condições de campo durante a estação seca e chuvosa.

7.2 Material e métodos

7.2.1 Área de estudo

A área experimental é uma bacia de primeira ordem de 2,8 ha com declividade de 5,6%. O solo tem profundidade de 2,0 m, e é classificado como Vertissolo, com predominância de argilominerais expansivos 2:1 do grupo montmorilonita (Embrapa, 2013). Está localizado em um fragmento representativo de uma floresta tropical seca sazonalmente no nordeste do Brasil (Figura 10), em regeneração da vegetação após desmatamento, queima e plantio de pastagem em 2010.

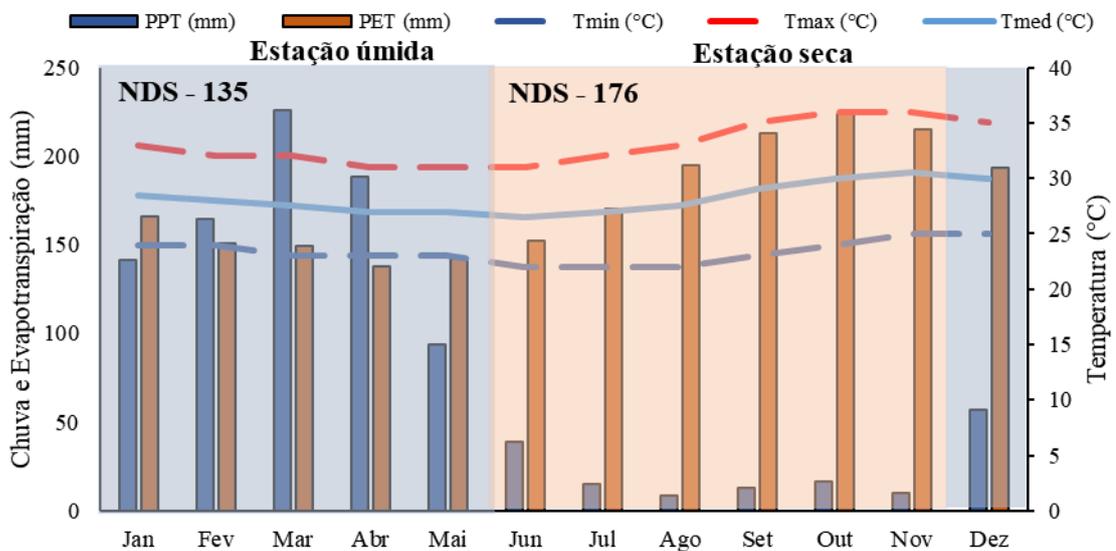
Figura 10 - Localização da área de estudo



Fonte: Próprio autor.

O clima é classificado como semiárido quente (BSh), segundo a classificação de Köppen, com índice de aridez de 0,48, tem evapotranspiração potencial média anual de 2113 mm ano⁻¹ e precipitação média anual de 997 ± 300 mm. Oitenta e nove por cento da precipitação anual concentra-se no semestre chuvoso de dezembro a maio (Figura 11) (Campos; Andrade, 2021; Guerreiro *et al.*, 2021).

Figura 11- Médias históricas no período de 1980 a 2020 da evapotranspiração potencial (mm), chuva (mm), temperaturas mínimas, máximas, médias (°C) e número médio de dias secos (NDS) para estação úmida e estação seca na área de estudo.



Fonte: Próprio autor.

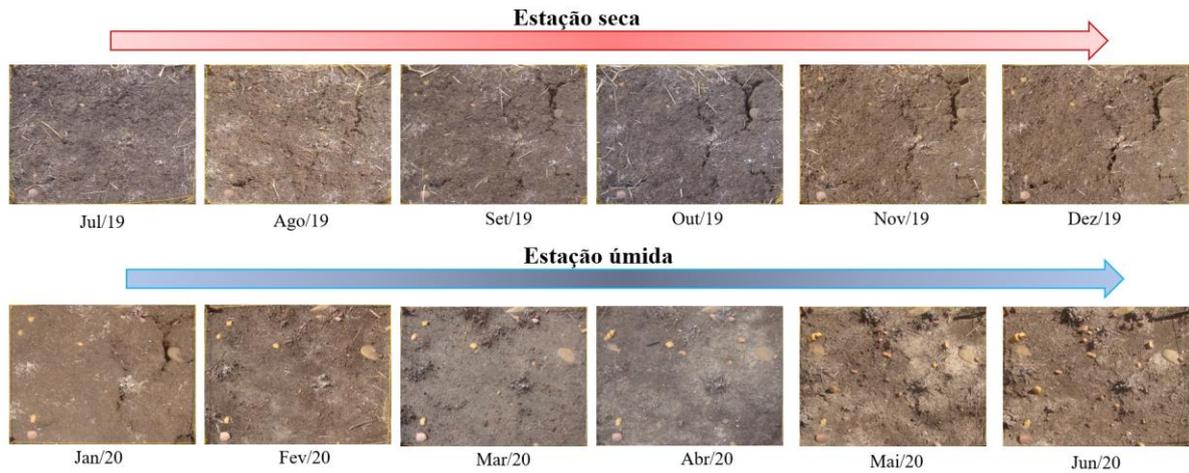
*PET - evapotranspiração potencial média mensal (mm); PPT - precipitação média mensal (mm); Tmin - temperatura média mínima mensal (°C); Tmax - temperatura máxima média mensal (°C), Tmed - temperatura média mensal (°C), NDS - número médio mensal de dias secos

7.2.2 Morfologia das fendas

As fendas do solo foram monitoradas em seis parcelas experimentais de 1 m² (1 m x 1 m) aleatoriamente localizadas (Figura 2) por um ano – 1º de julho de 2019 a 30 de junho de 2020. Toda a vegetação dentro e ao redor das parcelas foi removida antes das medições de campo (pelo menos semanalmente), mantendo as parcelas livres de vegetação durante todo o período de estudo para minimizar as alterações na estrutura do solo. O monitoramento das fendas consistiu na aquisição de imagens (Figura 12), localização das fendas e medição da respectiva profundidade (Figura 12). Nas mesmas datas e adjacentes a cada parcela, foram coletadas amostras de solo para determinação da umidade do solo pelo método gravimétrico

para uma profundidade de 0,0-0,1 m, e coletou-se dados de chuva através de um pluviômetro *Ville de Pari*.

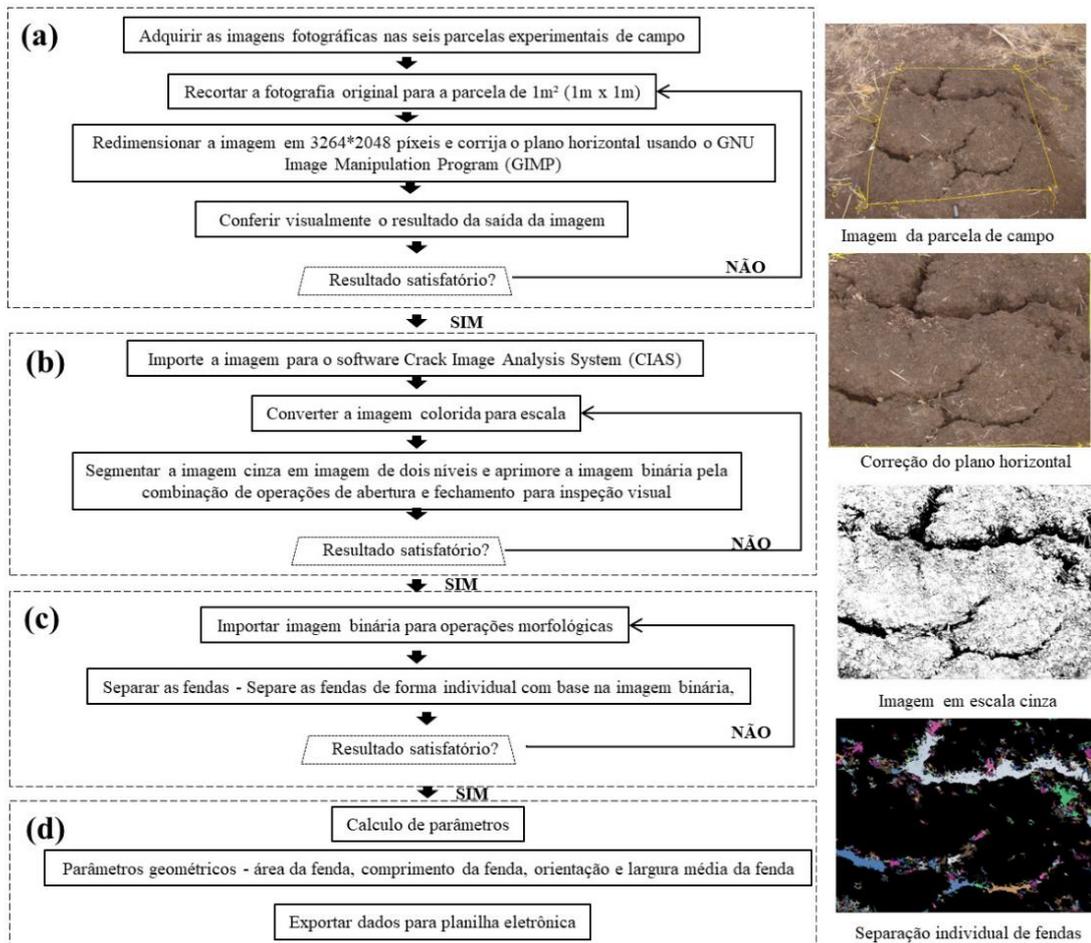
Figura 12 - Identificação de fendas no solo nas parcelas experimentais durante a estação seca e úmida



Fonte: Próprio autor.

Uma câmera Sony® - DSC-H9 colocada sobre um tripé com 1,5m, sempre posicionado no mesmo local coletou as imagens das parcelas. As imagens fotográficas foram realizadas nas melhores horas de luz (entre 12:00 e 13:00 horas), exceto em dias chuvosos, quando as fotos foram tiradas após o término do evento ou na manhã seguinte, para posterior processamento. A coleta de dados de área, largura e comprimento das trincas está descrita na Figura 13, conforme proposto por Liu *et al.* (2013).

Figura 13 - Fluxograma da metodologia de reconhecimento e quantificação de fendas: (a) pré-processamento, (b) segmentação de imagem, (c) morfologia operações, e (d) cálculo de parâmetros. Ao lado é possível observar o passo a passo do processamento da imagem



Fonte: Próprio autor.

Além da coleta de imagens, as rachaduras também foram identificadas com o auxílio de uma rede de 0,05 m × 0,05 m colocada sobre as parcelas (Figura 14a). As medidas de profundidade das fendas usaram uma haste e uma régua (Figura 14b), e o volume das fendas foi determinado como sugerido por Stewart; Najm (2020), no qual considerou-se um retângulo e calculou-se o produto da área por sua profundidade.

Figura 14 - Grid para leitura de profundidade: (a) inserção de haste na fendas; (b) medição de haste para determinar a profundidade



Fonte: Próprio autor.

7.2.3 *Propriedades do solo*

Os principais atributos físicos do solo em cada parcela experimental, destacam a variabilidade espacial dos solos da bacia por localização (próximo ao exutório - P1 e P2; região intermediária - P3 e P4; e próximo as cabeceiras - P5 e P6) (Tabela 2). A classificação geral do solo é a mesma em todas as parcelas (Vertissolo), com profundidade de 2 m, embora P3 e P6 diferem na classificação textural. As demais características químicas das parcelas são apresentadas no Apêndice – Tabela 4.

Tabela 2 - Características físicas do solo

Propriedades do solo	Parcelas Observadas					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
<i>Análise granulométrica</i>						
Areia (%)	21,0	26,0	41,0	22,0	27,0	44,0
Silte (%)	43,0	46,0	33,0	41,0	41,0	36,0
Argila (%)	36,0	28,0	26,0	37,0	32,0	20,0
Matéria Orgânica (%)	0,8	1,5	1,3	1,4	1,9	2,2
Saturação de Base (%)	92,0	95,0	84,0	95,0	92,0	89,0
pH	6,6	7,1	6,0	6,8	6,6	6,7
Densidade de partículas	2,79	2,57	2,53	2,53	2,48	2,52
Limite de liquides (%)	43,0	38,0	28,0	42,0	40,0	33,0
Limite de plasticidade (%)	14,0	27,0	21,0	32,0	26,0	27,0
Índice de plasticidade	30,0	12,0	7,0	10,0	14,0	7,0
Classificação Textural	Franco argilosa	Franco argilosa	Franca	Franco argilosa	Franco argilosa	Franca

Fonte: Próprio autor.

7.2.4 Análises estatísticas

A densidade da área de fendas do solo (D_c) (Equação 1) foi calculada de acordo com a metodologia proposta por (Miller; Kishné; Morgan, 2010), e seu nível de desenvolvimento (Tabela 3) foi avaliado com base em Xiong *et al.*, (2010):

$$D_c = \frac{a_c}{A_t} * 100 \quad \text{Equação 5}$$

Em que: a_c – área de fendas (m^2) e A_t – área total (m^2)

Tabela 3 - Níveis de desenvolvimento de fendas no solo

Intervalos	Níveis de desenvolvimento
$D_c \leq 5\%$	Fraco
$5 < D_c \leq 10$	Leve
$10 < D_c \leq 22$	Médio
$22 < D_c \leq 27$	Intensivo
$D_c > 27$	Extremamente intensivo

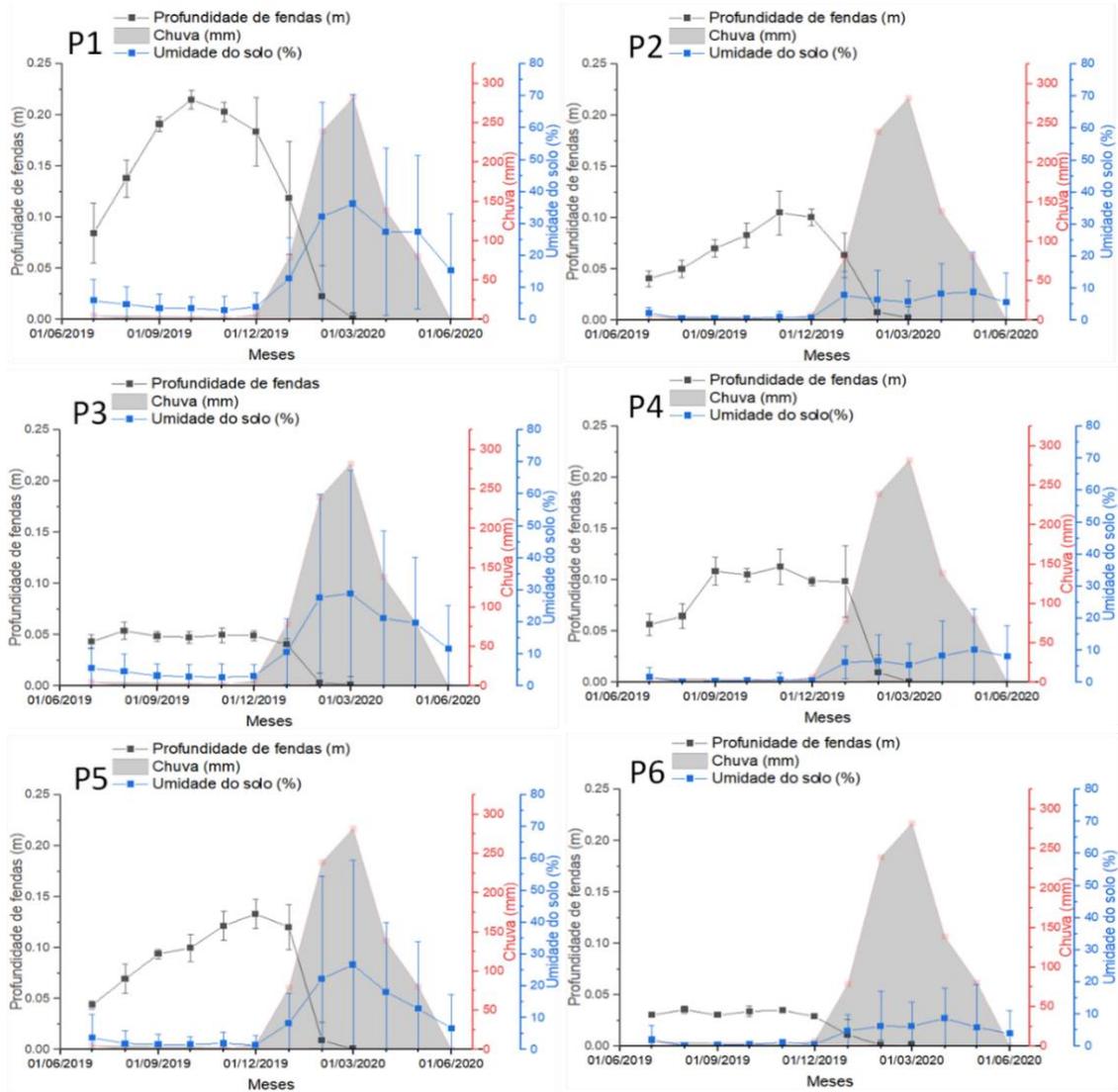
Fonte: Adaptado de Xiong *et al.* (2010)

As características morfométricas das fendas: Dc, profundidade e volume, foram testadas quanto à normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Diante da não normalidade do conjunto de dados, foi então aplicado o teste de Kruskal-Wallis para comparar as medianas entre as parcelas estudadas com nível de significância de 5%. Todas as análises estatísticas foram realizadas com os seguintes softwares: *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) versão 16.0, e Microsoft Excel®.

7.3 Resultados

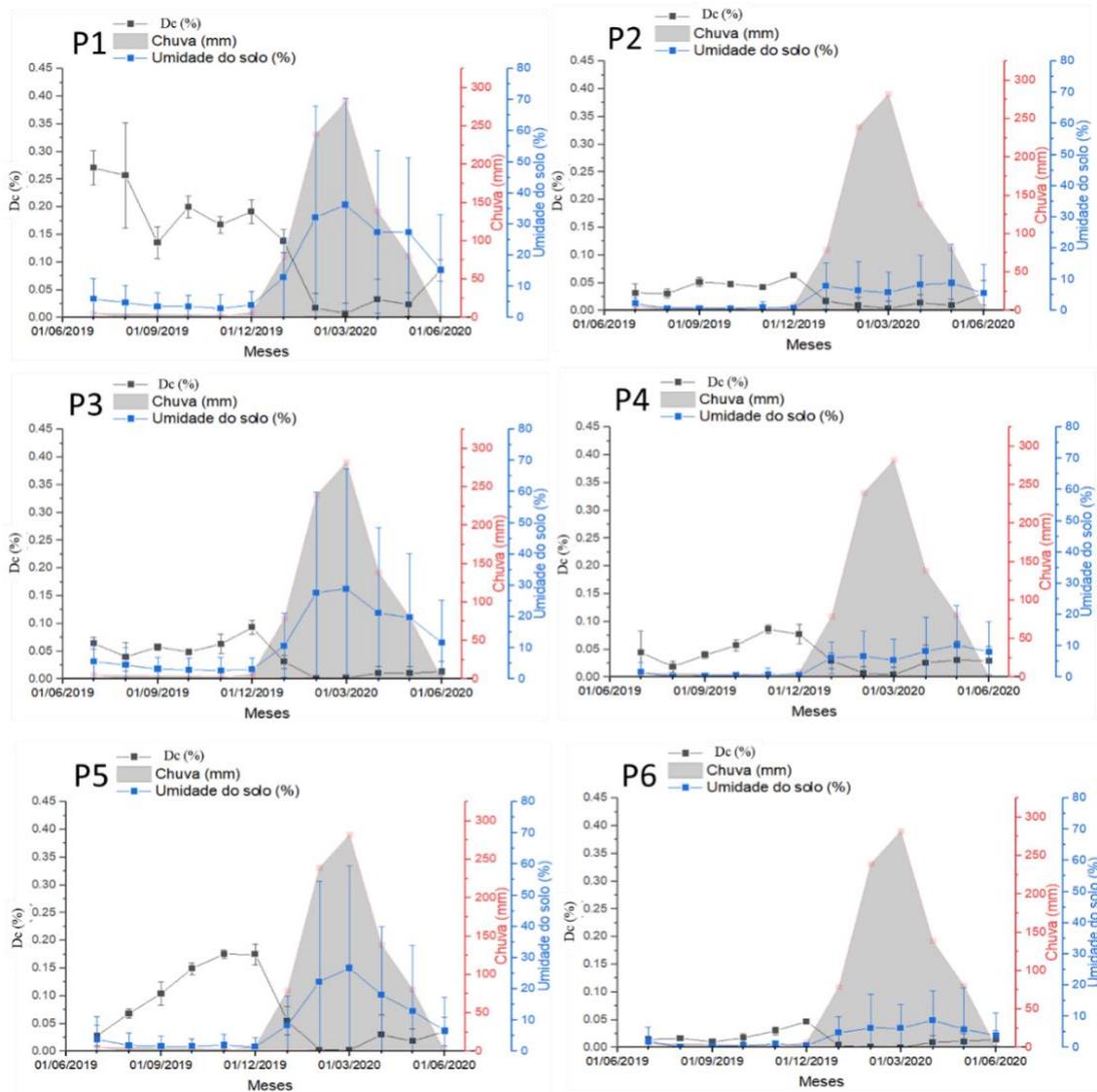
Com base no número de fendas no solo e respectivas características morfométricas, observamos maior número, profundidade e volume no final da estação seca (Figuras 15, 16 e 17), conforme esperado. As parcelas P1 (aproxima ao exutório da bacia) e P5 (próxima a cabeceira da bacia montante) apresentaram as fendas mais profundas, maior área e volume das fendas, bem como uma maior variabilidade desses parâmetros em relação às demais parcelas. A menor variabilidade na profundidade das fendas, Dc e volume de fenda ocorreu nas parcelas com maiores teores de areia (P3 e P6), e os menores valores médios mensais foram registrados na parcela P6 com 4,7%, 0,035 m e 0,0013 m³ para Dc, profundidade de fenda e volume de fenda, respectivamente.

Figura 15 - Variação da profundidade de fendas, umidade do solo e chuva durante o período de estudo



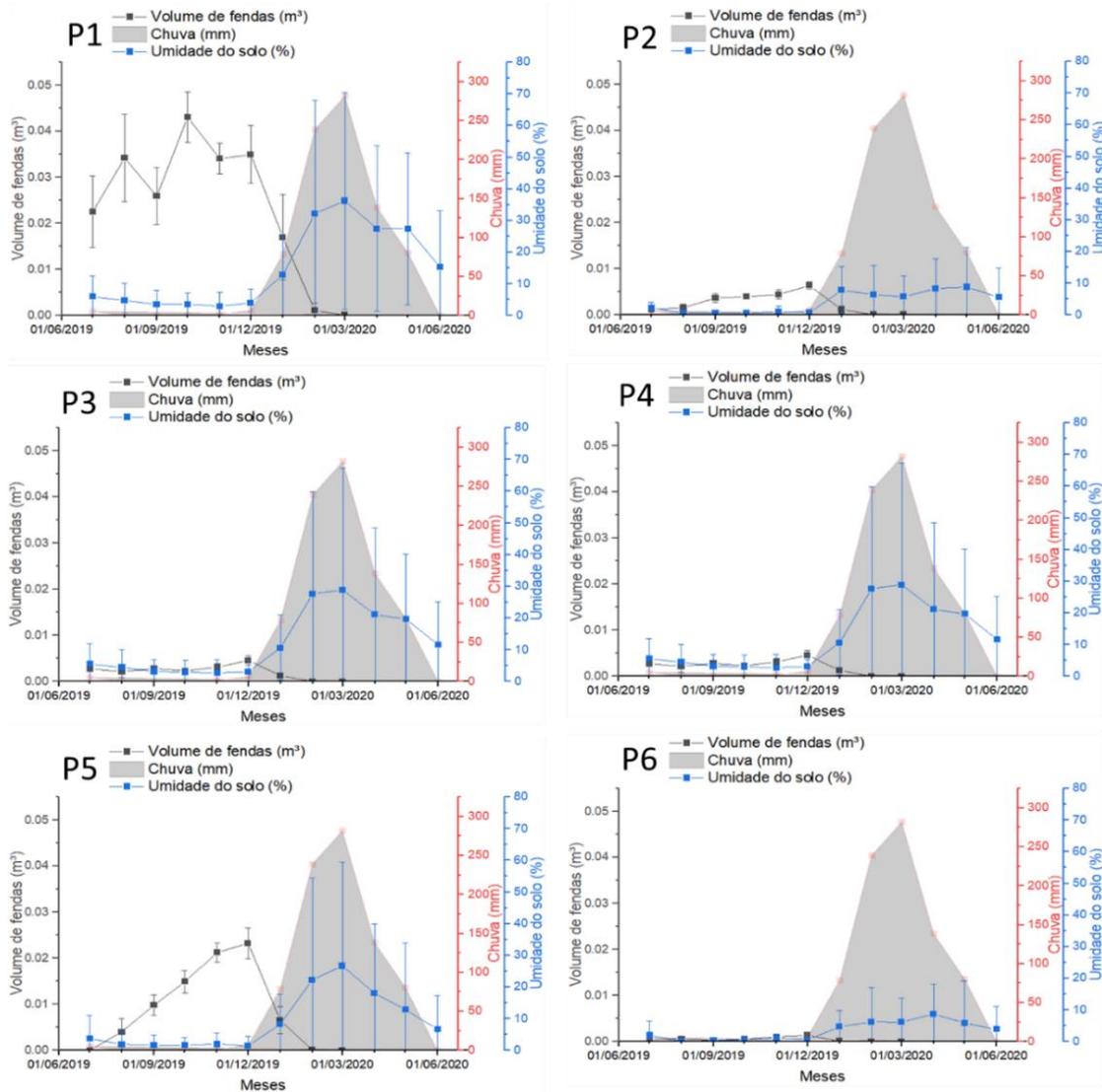
Fonte: Próprio autor.

Figura 16 - Variação da Dc de fendas, umidade do solo e chuva durante o período de estudo



Fonte: Próprio autor.

Figura 17 - Variação do volume de fendas umidade do solo e chuva durante o período de estudo



Fonte: Próprio autor.

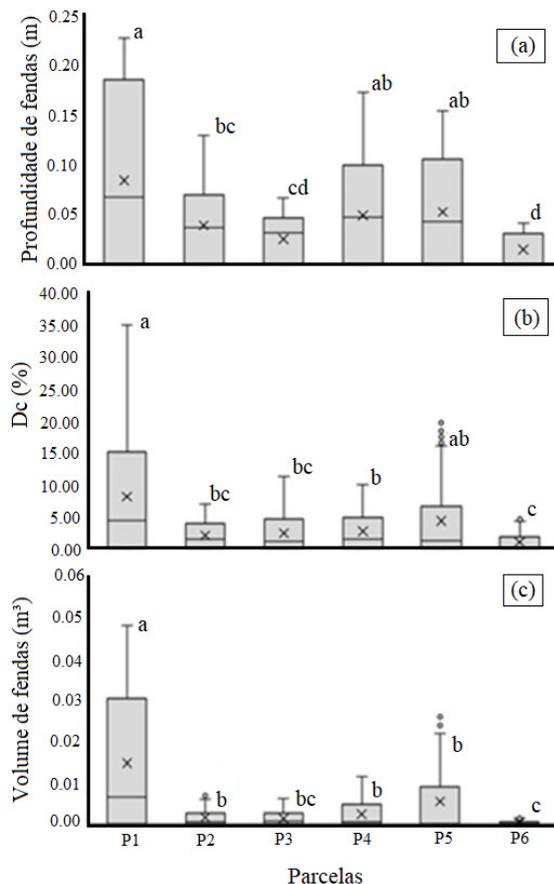
Durante o período seco (jul/19 a dez/19) a parcela P1 apresentou aumento da profundidade das fendas ao longo do tempo, registrando profundidade máxima de 0,23 m (Figura 15) e volume máximo de 0,048 m³ (Figura 17). Destaca-se que durante a estação seca, a variação mensal de Dc não foi consistente em todas as parcelas, aumentando e diminuindo de forma diferenciada nas diferentes áreas da microbacia (Figura 16). No entanto, a parcela P5, não apresentou redução de Dc durante a estação seca. Nos meses de agosto e setembro de 2019, houve redução do Dc mais acentuada na parcela P1, embora não tenha ocorrido redução na profundidade das fendas (Figura 15), sugerindo a ocorrência de um fenômeno na camada superficial do solo.

As fendas no solo mais profundas se desenvolveram nas parcelas com maiores teores de argila (P1, P2, P4 e P5 - Tabela 2), com valores de até 0,23 m (Figura 15). Nas parcelas com

menores teores de argila (P3 e P6 - Tabela 2) a profundidade das fendas tende a se estabilizar, ou seja, as profundidades das fendas apresentam valores semelhantes ao longo do período seco (Figura 15). Apenas a parcela P5 registrou aumento da Dc e do volume de fendas durante a estação seca (Figuras 16 e 17), enquanto as demais parcelas não apresentaram padrão na morfologia das fendas no mesmo período. As parcelas com teor de argila inferior a 28% e limite de liquidez inferior a 38% (P2, P3 e P6) (Tabela 2) apresentaram a menor variabilidade de Dc e volume de fendas.

A parcela P1 (próxima ao exutório - Figura 10) difere estatisticamente ($p < 0,05$) das demais parcelas para volume de fendas, porém não difere da parcela P4 para profundidade de fendas e da parcela P5 para profundidade de fendas e Dc (Figura 18). A parcela P6, na parte superior da microbacia, diferiu de todas as parcelas ($p < 0,05$) para todas as características morfométricas analisadas, exceto a parcela P3 (Figura 18). Esses resultados mostram que existe uma diferença estatística entre a parte superior da microbacia (P6) e a parte inferior da microbacia (P1).

Figura 18 - Comparação das características morfométricas das parcelas (a) profundidade das fendas; (b) Dc e (c) volume de fendas

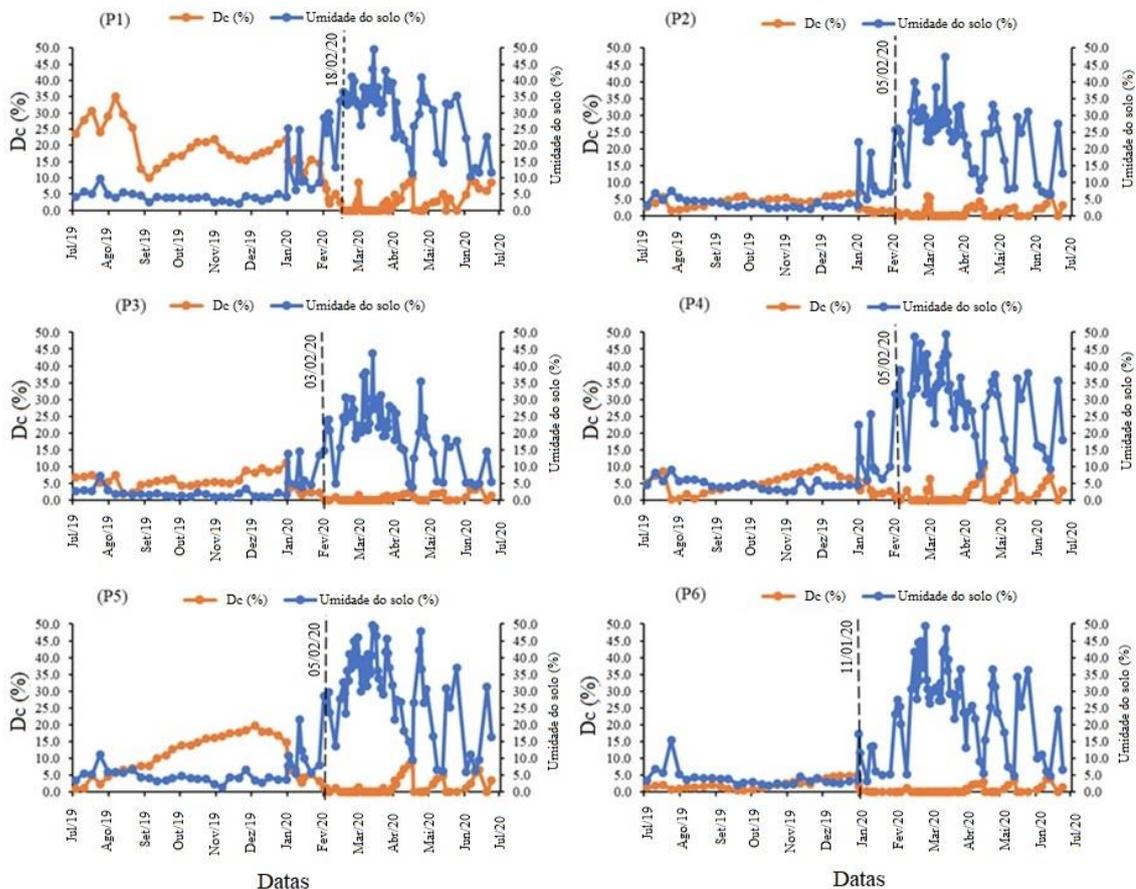


Fonte: Próprio autor.

Os pontos localizados na parte intermediária da bacia (P2, P3, P4 e P5) não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) para quaisquer características morfométricas (Figura 18). No entanto, P2 e P3 diferem de P1 para todas as características morfométricas. Para todas as características monitoradas P1 apresenta maior variabilidade temporal enquanto P6 apresenta as menores variações (Figura 18).

Dc variou ao longo do período de estudo de 0 a 35% (Figura 19). Por 292 dias (86% do período estudado), as fendas apresentaram Dc Fraca ou Leve (Tabela 3). Apenas as parcelas P1 e P5 apresentaram um nível de desenvolvimento acima do médio ($Dc > 11\%$), e apenas a parcela P1 atingiu um nível extremamente intensivo ($Dc > 27\%$). Durante a estação úmida, foi observada redução da Dc em todas as parcelas em estudo em julho/2019 (Figura 19), conforme esperado, variando de 7% (P4) a 2% (P6). O único evento de precipitação registrado no período seco, que totalizou 5,5 mm (Apêndice – Tabela 5), aumentou a umidade do solo em até 10% na parcela P6, e reduziu a Dc em todas as parcelas (Figura 19).

Figura 19 - Variação DC e variabilidade da umidade do solo ao longo do período - fases de expansão e contração



Fonte: Próprio autor.

Durante o período de estudo, com início da estação chuvosa no final de dezembro, houve predominância de Dc abaixo de 11%. A vedação total das fendas ocorreu 87 dias após o primeiro evento de chuva, quando a umidade do solo estava acima de 31% em todas as parcelas (Figura 11). Essa umidade do solo foi registrada no dia 18/02/20, após um evento pluviométrico de 52,4 mm e um acumulado de 75 mm nos 5 dias anteriores. Dezenove eventos de chuva foram registrados durante o intervalo entre o primeiro evento de chuva (13/12/19) e 18/02/20, acumulando uma precipitação total de 236 mm, representando 27% do total de precipitação durante o período estudado (877 mm).

Observa-se também (Figura 19) que 50% do tempo em que as trincas permaneceram seladas continuamente foi em março quando $D_c = 0$, de 03/05/20 a 19/03/20 (15 dias). Nesse período, foram observados 11 eventos de chuva, correspondendo a 260 mm de chuva acumulada (Apêndice- Tabela 5). No período de 20/02/20 a 25/02/20 as rachaduras permaneceram vedadas com 82 mm de chuva acumulada no período (Apêndice – Tabela 5). Durante o restante do período, dois dias consecutivos sem chuva foram suficientes para reduzir a umidade do solo em 3% e promover a formação de fendas superficiais.

7.4 Discussões

A contração das argilas expansivas durante os períodos secos e a expansão com a ocorrência de dias úmidos (Bullard *et al.*, 2018), promove o aumento/diminuição da profundidade, intensidade e volume das fendas (Figuras, 15, 16 e 17). Logo após a ocorrência de um evento de chuva (5,5 mm, 24/07/19), na estação seca, ou após os primeiros eventos de chuva na estação chuvosa, iniciou-se o processo de expansão das argilas com o aumento das forças hidrostáticas (Tang *et al.*, 2021) nas camadas superficiais, promovendo o selamento de micro fendas antes mesmo do início do processo de escoamento superficial. Em uma segunda fase, quando se inicia o escoamento, as fendas mais profundas passam a atuar como caminhos preferenciais de drenagem (Dinka *et al.*, 2013; Santos *et al.*, 2016), contribuindo para a infiltração em camadas mais profundas (Bordoloi; Ni; Ng, 2020).

Durante o processo de secagem em condições de campo, a redução da umidade do solo aumenta a força de adesão entre água e solo, elevando assim a tensão efetiva na rede de fendas do solo. As forças de adesão entre água e argila nas camadas mais profundas do solo, promove seu fechamento em movimento ascendente, sendo observada redução da profundidade das fendas ao longo da estação chuvosa (Figura 15).

Em argilas com alto índice de plasticidade, os processos de expansão/contração ocorreram em ritmo mais acelerado (Rayhani; Yanful; Fakher, 2008; Wang *et al.*, 2018), imprimindo diferentes tempos de impermeabilização do solo nas parcelas investigadas (Figuras 15, 16, 17e 18). Este fato mostra que os processos de expansão e contração se desenvolvem em solos argilosos expansivos quando o teor de umidade diminui até o valor do limite de liquidez. Tal evidência resulta na diferença estatística no volume de fendas entre a parcela P1 com maior volume e maior plasticidade e P4 e P5 (Figura 17) com menores volumes e menores índices de plasticidade embora essas parcelas, P1, P4 e P5 apresentem classificação textural do solo semelhante (Tabela 2), conforme discutido por Tang *et al.* (2021). Portanto, além da quantidade de argila, a diferença no teor de umidade entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade desempenha um papel importante na variação das características morfométricas (Sharanya *et al.*, 2021).

Embora valores maiores de Dc tenham sido obtidos em parcelas de solo com maiores teores de argila, os valores de Dc não podem ser explicados apenas pelo teor de argila – embora P1 e P4 tenham teores de argila semelhantes (Tabela 2), o comportamento de abertura de fendas (Figuras 15, 16 e 17) diferiu estatisticamente ($p < 0,05$). A diferença dos valores de Dc para os solos dessas duas parcelas é explicada pelo limite de liquidez e plasticidade (Tabela 2), indicando que existem diferentes tipos de argila nas parcelas estudadas. Acredita-se que pequenos poros que permitem o desenvolvimento de maior força de adesão entre solo e água, tenham se formado em solos com maiores teores de argila (Ferreira *et al.*, 2020). Assim, a adesão da água no solo, resulta no aumento do peso unitário da argila, bem como nas forças de adesão e redução das forças de coesão (Rayhani; Yanful; Fakher, 2008; Ferreira *et al.*, 2020).

Embora não tenham sido registrados eventos isolados de precipitação durante a estação seca (julho a dezembro), (exceto 24/07/19, 5 mm), em agosto e setembro houve redução no valor de Dc (Figura 19). Sabe-se que Dc diminui com a adição de água ao solo. Nesta época do ano, para a região em estudo, as possíveis fontes de entrada de água não precipitada na camada do solo em estudo são os processos de ascensão capilar ou condensação do vapor d'água nas primeiras horas da manhã, quando a temperatura do ar e do solo atingem a temperatura do ponto de orvalho (Guerreiro *et al.*, 2022). Como não houve redução na profundidade das fendas (Figura 15), o processo de ascensão capilar foi descartado, implicando que é um fenômeno de superfície que promove a diminuição de Dc.

Acredita-se que o aumento da umidade superficial do solo seja resultado tanto da formação de orvalho, quanto da adsorção do vapor d'água da atmosfera do solo às partículas do solo durante a noite, quando há diminuição da temperatura do solo, processos registrados na

área de estudo (Guerreiro *et al.*, 2022) e em outras regiões semiáridas (Wang *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2018; Dou *et al.*, 2021). O processo de aumento da umidade do solo por orvalho nos meses de temperaturas mínimas mais baixas é sustentado por Guerreiro *et al.* (2022) em área adjacente à bacia estudada, elevando a umidade do solo à noite em 5%. Houve também aumento da umidade do solo pelo processo de condensação na interface solo/atmosfera, responsável pela redução da Dc (Figura 16 e 19).

O processo de selamento superficial das fendas ocorreu de forma gradual e inversa ao teor de umidade do solo (Figuras 16 e 19). A redução de 4% da umidade do solo foi suficiente para o surgimento de fendas no solo, pois a água do solo evapora em duas dimensões – verticalmente pela superfície do solo e horizontalmente pelas paredes das rachaduras (Tang *et al.*, 2021). Como a taxa de evaporação em duas dimensões é maior do que em uma dimensão, as fendas se desenvolvem mais rapidamente na fase primária (Santos *et al.*, 2016), resultando em um número crescente de conexões entre fendas (Xiong *et al.*, 2010). Ressalta-se que 75% dos eventos pluviométricos foram inferiores a 10 mm e 52% foram inferiores a 5 mm antes da vedação inicial das fendas.

Quando observamos o grau de desenvolvimento das fendas, as parcelas P1 e P5 registraram nível médio de desenvolvimento para Dc (Tabela 3), evidenciando que a redução da umidade em solos com maiores índices de plasticidade resulta em deformações inicialmente leves e depois pronunciadas, quando em comparação com solos menos plásticos (Tang *et al.*, 2018; Tang *et al.*, 2021). O menor teor de argila nas parcelas P3 e P6 (Tabela 2) reduziu o grau de fechamento das fendas, sendo regida pela plasticidade do solo que determina o potencial de expansão e contração do solo (Rayhani; Yanful; Fakher, 2008).

7.5 Conclusões

A intensidade de ocorrência, profundidade e volume máximo das fendas variam de acordo com a textura, limites plásticos e líquidos, atingindo valores mais elevados em parcelas com maior teor de argila e maior plasticidade. A profundidade das fendas apresenta maior resposta às mudanças ambientais (chuvas, umidade e número de dias secos). O comportamento mecânico do solo fendilhado não saturado para impermeabilização total ocorreu de forma diferente entre as parcelas, com o fechamento inicial nas parcelas com teor de areia acima de 40%, fechamento quando a umidade do solo estava acima de 24% e precipitação acumulada de 109 mm. Para parcelas com partículas finas (silte + argila) acima de 70%, o fechamento total

das parcelas ocorreu quando a umidade do solo em toda a bacia estava acima de 31% e a precipitação acumulada acima de 222 mm desde o primeiro evento registrado, sendo controlado tanto pela umidade do solo quanto pela frequência e acúmulo de chuvas anteriores. A ocorrência de fendas no solo foi influenciada pelo número de dias secos após dias contínuos de chuva, com o desenvolvimento de fendas após dois dias secos consecutivos.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e à Fundação Estadual de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) do Ceará pelo seu apoio financeiro para esta pesquisa.

Apêndice

Tabela 4– Características químicas das parcelas experimentais

Parcelas	Cátions trocáveis (cmol _c kg ⁻¹)						C (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	P assimilável (mg kg ⁻¹)
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	H ⁺ + Al ⁺	Al ³⁺			
P1	28,90	3,00	0,82	0,49	2,97	0,05	4,92	0,50	5,00
P2	29,30	3,90	0,63	0,42	1,65	0,00	8,88	0,95	3,00
P3	16,80	6,30	0,50	0,24	4,62	0,20	7,80	0,84	1,00
P4	30,50	7,00	0,39	0,54	1,98	0,00	7,92	0,85	2,00
P5	31,60	3,70	0,47	0,39	3,14	0,05	10,86	1,25	2,00
P6	20,90	3,40	0,34	0,34	3,14	0,05	12,84	1,36	8,00

Tabela 5– Precipitação diária durante o período de estudo

Data	chuva (mm)	Data	chuva (mm)	Data	Chuva (mm)	Data	Chuva (mm)
24/07/2019*	5,5	18/02/2020	52,4	16/03/2020	55,4	27/04/2020	14
13/12/2019	1,2	19/02/2020	3,4	18/03/2020	5,2	01/05/2020	1.4
16/12/2019	5,0	20/02/2020	40,8	24/03/2020	5,4	12/04/2020	0.8
01/01/2020	5,4	22/02/2020	4,6	25/03/2020	5,0	13/05/2020	1.0
03/01/2020	1,0	23/02/2020	14,5	26/03/2020	16,8	16/05/2020	18.6
06/01/2020	1,2	24/02/2020	3,5	27/03/2020	11,4	17/05/2020	1.4
08/01/2020	4,0	25/02/2020	19,1	30/03/2020	0,6	19/05/2020	7.8
10/01/2020	1,2	29/02/2020	3,2	02/04/2020	0,8	20/05/2020	7
21/01/2020	10,0	01/03/2020	0,6	03/04/2020	6,6	21/05/2020	6
26/01/2020	1,4	04/03/2020	26,4	04/04/2020	1,8	22/05/2020	2.8
27/01/2020	4,2	05/03/2020	1,0	12/04/2020	3,6	23/05/2020	1.8
31/01/2020	47,0	07/03/2020	22,4	17/04/2020	6,6	24/05/2020	4.8
02/02/2020	5,2	09/03/2020	12,2	20/04/2020	7,0	25/05/2020	30.4
02/03/2020	15,5	10/03/2020	3,8	21/04/2020	1,4	26/05/2020	0.6
04/02/2020	1,0	11/03/2020	3,6	22/04/2020	32,0	02/06/2020	2.0
05/02/2020	57,2	12/03/2020	6,4	23/04/2020	6,6	07/06/2020	1.6
15/02/2020	19,0	13/03/2020	99,0	24/04/2020	52,4	09/06/2020	0.6
16/02/2020	1,8	14/03/2020	2,6	25/04/2020	0,6	19/06/2020	11.2
17/02/2020	2,0	15/03/2020	48,6	26/04/2020	0,8	26/06/2020	5.0

8 USO DE DADOS CLIMÁTICOS PARA PREVER A GEOMETRIA DE FENDAS EM SOLOS EXPANSIVOS

Resumo: A dinâmica não linear dos fatores determinantes das características morfométricas de fendas em solos expansivos tornam a sua tipificação um desafio, principalmente em condições de campo. Para superar essa dificuldade, objetivou-se utilizar redes neurais artificiais (RNA) para estimar as características de fendas em Vertissolo sob condições de campo. De julho/2019 a junho/2020, as características morfométricas das fendas do solo (área, profundidade e volume) e os fatores ambientais (umidade do solo, chuva, evapotranspiração potencial e balanço hídrico) foram monitorados e avaliados em seis parcelas experimentais em uma região semiárida tropical. Sessenta e seis eventos foram medidos em cada parcela para calibrar e validar dois conjuntos de entradas do modelo de rede neural multicamada. Um conjunto de dados foi composto pelos fatores ambientais com correlações significativas com as características morfométricas das fendas no solo. O outro conjunto de dados inclui apenas as variáveis com correlação significativa alta e muito alta, reduzindo o número de variáveis em 35%. O conjunto com correlações significativas alta e muito alta apresentou maior acurácia na previsão das características de fendas no solo, implicando que é preferível ter menos variáveis com maior correlação do que ter mais variáveis de menor correlação no modelo. Ambos os conjuntos de dados mostraram um bom desempenho na previsão de área e profundidade de fendas em solos com teor de argila acima de 30%. A maior dispersão dos valores modelados sobre o previsto para todas as características morfométricas foi em solos com teor de areia acima de 40%. O modelo foi bem-sucedido na avaliação das características das fendas a partir de fatores ambientais dentro de suas limitações e pode subsidiar decisões de gestores de bacias hidrográficas diante de cenários de mudanças climáticas.

Palavras-chave: inteligência artificial; expansão e contração; Vertissolo; regiões tropicais secas

³ Artigo publicado no periódico Sustainability no dia 08/01/2022, v. 14, nº 2, p 1-16, link de acesso: <https://doi.org/10.3390/su14020675>

CLIMATE DATA TO PREDICT GEOMETRY OF CRACKS IN EXPANSIVE SOILS IN A TROPICAL SEMIARID REGION

Abstract: The nonlinear dynamics of the determining factors of the morphometric characteristics of cracks in expansive soils make their typification a challenge, especially under field conditions. To overcome this difficulty, we used artificial neural networks to estimate crack characteristics in a Vertisol under field conditions. From July 2019 to June 2020, the morphometric characteristics of soil cracks (area, depth and volume), and environmental factors (soil moisture, rainfall, potential evapotranspiration and water balance) were monitored and evaluated in six experimental plots in a tropical semiarid region. Sixty-six events were measured in each plot to calibrate and validate two sets of inputs in the multilayer neural network model. One set was comprised of environmental factors with significant correlations with the morphometric characteristics of cracks in the soil. The other included only those with a significant high and very high correlation, reducing the number of variables by 35%. The set with the significant high and very high correlations showed greater accuracy in predicting crack characteristics, implying that it is preferable to have fewer variables with a higher correlation than to have more variables of lower correlation in the model. Both sets of data showed a good performance in predicting area and depth of cracks in the soils with a clay content above 30%. The highest dispersion of modeled over predicted values for all morphometric characteristics was in soils with a sand content above 40%. The model was successful in evaluating crack characteristics from environmental factors within its limitations and may support decisions on watershed management in view of climate-change scenarios.

Keywords: artificial intelligence; swelling and shrinking; Vertisol; tropical dry regions

8.1 Introdução

As fendas do solo é um fenômeno natural observado em solos com argilominerais expansivos após secagem e ocorre principalmente em terras secas que cobrem aproximadamente 40% da área terrestre do mundo (Fao, 2015) na África do Sul, Austrália, América, Índia e China. Os Vertissolos cobrem aproximadamente 335 Mha (Un, 2019), e são mais comuns nos trópicos semiáridos (Un, 2019; Tang *et al.*, 2021) com uma precipitação anual entre 500 mm e 1000 mm, expandindo quando úmido e contraindo quando seco, devido ao alto teor de argilominerais 2:1. A natureza de expansão e contração de solos verticos expansivos pode danificar estruturas de engenharia civil (Wang *et al.*, 2018; Cheng *et al.*, 2021), promover a poluição ambiental através de caminhos de fluxo preferenciais e comprometer o armazenamento de carbono (Mohanty *et al.*, 2020), comprometer lavouras agrícolas (Dupdal *et al.*, 2021; Qi *et al.*, 2021) e afetar a estabilidade de taludes (Guney *et al.*, 2007; Tang *et al.*, 2021).

Embora existam informações relevantes disponíveis (Bordoloi *et al.*, 2020; Tang *et al.*, 2021), compreender os processos de expansão e contração em solos expansivos em escala de campo ainda é um desafio para otimizar seu uso e manejo (Xiong *et al.*, 2010; Bullard *et al.*, 2018; Bordoloi *et al.*, 2020; Tang *et al.*, 2021). Estudos de campo sobre a interação fendas-solo-água-ambiente são escassos (Bordoloi *et al.*, 2020; Tang *et al.*, 2021), quando comparados com estudos de laboratório (Tang *et al.*, 2021).

Devido à escassez de dados sobre as características morfométricas das fendas no solo na maioria das localidades, há a necessidade de desenvolver modelos para serem aplicados em localidades com limitações de monitoramento. Esses modelos devem contar com variáveis de entrada obtidas a custos menores em relação aos métodos tradicionais de coleta. A inteligência artificial tem sido aplicada com sucesso no campo da gestão de recursos hídricos (Sari *et al.*, 2017; Teixeira *et al.*, 2020), e nos últimos anos modelos baseados em redes neurais artificiais (RNA) têm atraído pesquisadores para o estudo das interações água-solo-ambiente.

Modelos de previsão usando redes neurais artificiais precisam de menos dados de calibração e validação do que os modelos tradicionais. Assim, a técnica é mais econômica e fácil de usar, mantendo a precisão dos resultados. Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver e aplicar um modelo de rede neural artificial baseado em variáveis climáticas para estimar os parâmetros morfométricos de fendas formadas em condições de campo em um ambiente semiárido.

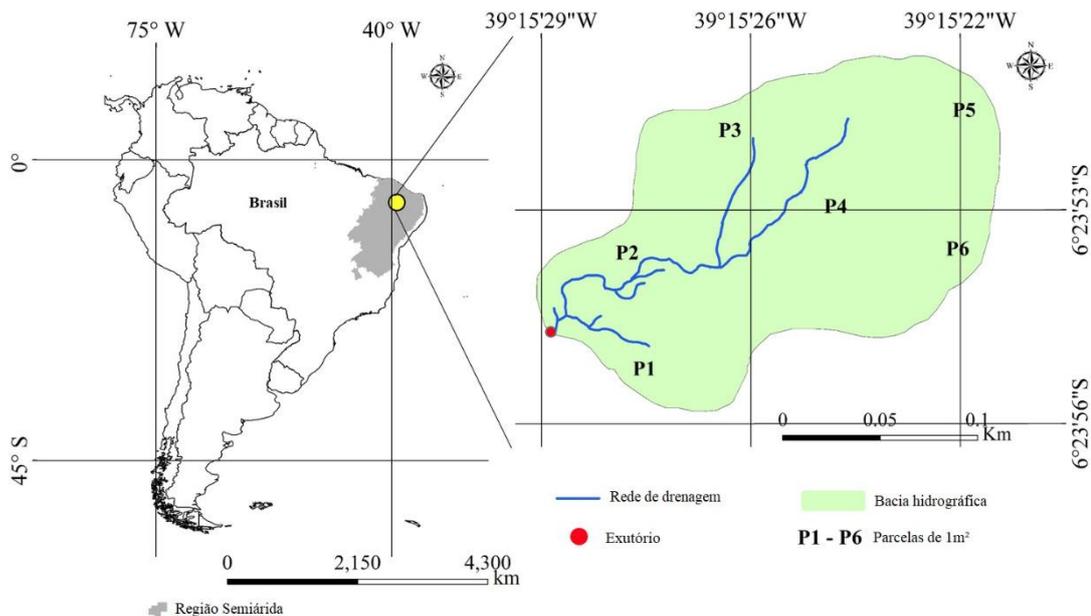
8.2 Material e métodos

8.2.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em uma bacia representativa de uma floresta tropical sazonalmente seca em ambiente semiárido. A precipitação média anual histórica da região é de 997 ± 300 mm, dos quais 89% estão concentrados no período de dezembro a maio (Campos, Andrade, 2021). A evaporação potencial média é de 2113 mm ano^{-1} , com índice de aridez de 0,48 (Guerreiro *et al.*, 2021).

A área de estudo é uma bacia hidrográfica de primeira ordem de 2,8 ha que está em regeneração após desmatamento, queima e plantio de pastagem em 2010 no nordeste do Brasil. Seis parcelas ($1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) (P1–P6) foram colocadas aleatoriamente na bacia de relevo suave para monitorar as características das fissuras (Figura 20). As parcelas foram monitoradas semanalmente, ou após um evento de chuva.

Figura 20 - Localização da área experimental no município de Iguatu-Ceará, Nordeste do Brasil



Fonte: Próprio autor.

O solo da bacia é classificado como Vertissolo, com predominância de argilominerais expansivos 2:1 do grupo montmorilonita (Embrapa, 2013). As características do solo de cada parcela são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características físicas do solo

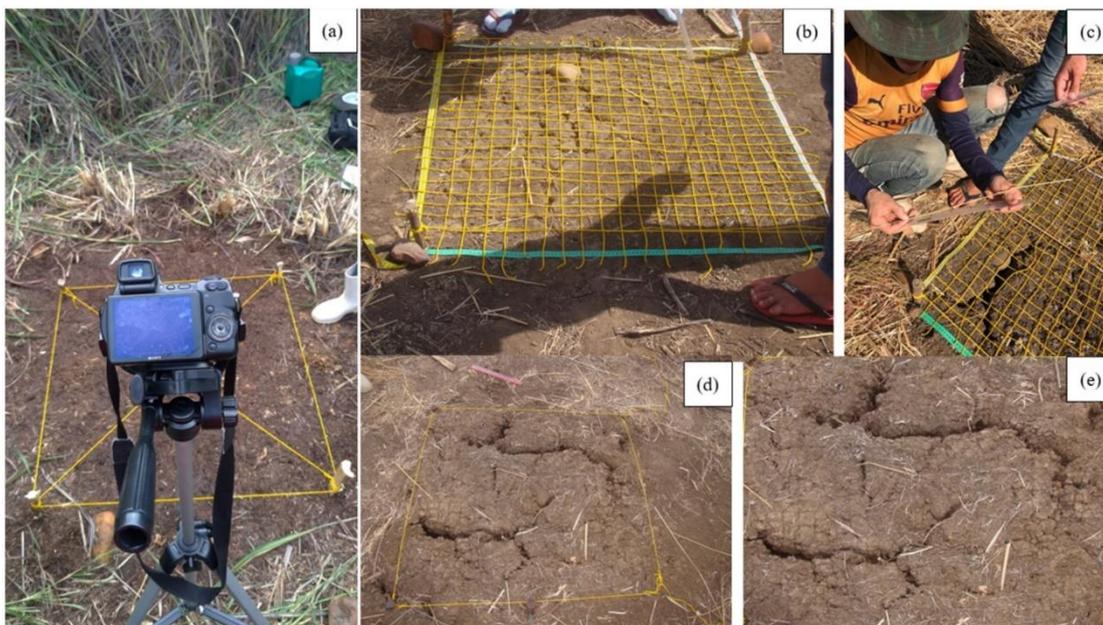
Propriedades do solo	Parcelas Observadas					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
<i>Análise granulométrica</i>						
Areia (%)	21	26	41	22	27	44
Silte (%)	43	46	33	41	41	36
Argila (%)	36	28	26	37	32	20
Matéria Orgânica (%)	0.8	1.5	1.3	1.4	1.9	2.2
Saturação de Base (%)	92	95	84	95	92	89
pH	6.6	7.1	6	6.8	6.6	6.7
Densidade de partículas	2.79	2.57	2.53	2.53	2.48	2.52
Limite de liquides (%)	43	38	28	42	40	33
Limite de plasticidade (%)	14	27	21	32	26	27
Índice de plasticidade	30	12	7	10	14	7
Classificação Textural	Franco argilosa	Franco argilosa	Franca	Franco argilosa	Franco argilosa	Franca

Fonte: Próprio autor.

8.2.2 Aquisição de dados

De julho de 2019 a junho de 2020, as características morfométricas das fendas do solo (área, profundidade e volume) e os fatores ambientais (umidade do solo, pluviosidade, evapotranspiração potencial e balanço hídrico) foram monitoradas e avaliadas nas seis parcelas experimentais (Figura 20). Todas as leituras foram realizadas semanalmente e após um evento de chuva, que totalizou 65 coletas. Uma grade (0,05 m × 0,05 m) foi montada permanentemente em cada parcela (1 m × 1 m) com cordões de linha amarela para acompanhar o desenvolvimento das fendas (Figura 21b).

Figura 21 - a) Posicionamento da câmera para coleta de imagens; (b) grade com pontos equidistantes para leituras de profundidade; (c) haste para leitura da profundidade das fendas; (d) imagem fotográfica sem correção horizontal; (e) imagem corrigida para o plano horizontal



Fonte: Próprio autor.

Durante as visitas de monitoramento, foram coletadas imagens fotográficas de cada parcela (Figura 21a). A câmera foi instalada em um tripé a 1 m de altura e em um ângulo de 30° em relação à parcela experimental. Todas as imagens foram registradas com a mesma configuração de câmera—melhor função de disparo, sem zoom e com área de foco constante (Bauer; Strauss, 2014). As imagens fotográficas foram corrigidas para um plano horizontal (Figura 21 d, e) utilizando o *software GNU Image Manipulation Program (GIMP)* versão 2.10.10 (Disponível em: <https://www.gimp.org/> acessado em 13 de julho de 2020).

Foram selecionadas 390 imagens (65 dias de coleta \times 6 parcelas) com base em critérios técnicos (luminosidade e sem sombreamento). Após a correção e seleção, as imagens foram analisadas para detecção de fendas e as características das fendas foram avaliadas com o *Software Crack Image Analysis System (CIAS)* (Disponível em: <http://acei.cn/program/CIAS/> acessado em 24 de julho de 2020), iterativamente. Após o processamento digital da imagem e transformação topológica, a quantificação automática das características geométricas das fendas (comprimento, perímetro e área) foi avaliada conforme proposto por Liu *et al.* (2013).

Com base na configuração da grade (0,05 m \times 0,05 m) para cada parcela (Figura 21b) e uma escala métrica, identificou-se e mediu-se as características das fendas no solo (Figura 21c) – localização, comprimento, largura e profundidade (Figura 21 b e c). As medidas foram

realizadas com auxílio de paquímetro, régua, pequenas hastes vegetais e trena a *laser*. O volume das fendas foi avaliado assumindo-se a forma de paralelepípedo (Stewart; Najm, 2020), sendo o produto da área da fenda pela sua profundidade.

O teor de umidade do solo (US) foi determinado diariamente, próximo a cada parcela, pelo método termogravimétrico na profundidade de 0,0-0,1m. A precipitação diária (PPT) foi medida com um pluviômetro *Ville* de Paris localizado no exutório da bacia, e a evapotranspiração potencial (PET) avaliada pelo método Hargreaves; Samani (1985) com parâmetros calibrados para a área de estudo (Lima Junior *et al.*, 2016). Um balanço hídrico simples (WB) baseado em PPT e PET foi avaliado diariamente ($WB = PPT - PET$).

8.2.3 Rede neural artificial

Para prever as características morfométricas de fendas no solo com base em dados climáticos e ambientais, desenvolveu-se modelos de redes neurais artificiais (RNA) com os dados adquiridos em campo. Aplicou-se uma correlação de Pearson ($p < 0,05$) (Apêndice – Tabela 9) entre as variáveis climáticas de entrada e a saída de fendas no solo (Tabela 7).

Tabela 7 - Variáveis de entrada e saída para o modelo análise de rede neural

Variáveis ambientais de entrada	Variáveis das características morfométricas das fendas de saída
<ul style="list-style-type: none"> • SM – Umidade do solo diária (%); • PPT01-PPT10 – Chuva acumulada de 1 a 10 dias antecedentes (mm); • ET01-ET10 – Evapotranspiração potencial de 1 a 10 dias antecedentes (mm) • WB01-WB10 - balanço hídrico simplificado de 1 a 10 dias antecedentes (mm) 	<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade (m) • Área (m²) • Volume (m³)

Fonte: Próprio autor.

Dois modelos foram desenvolvidos:

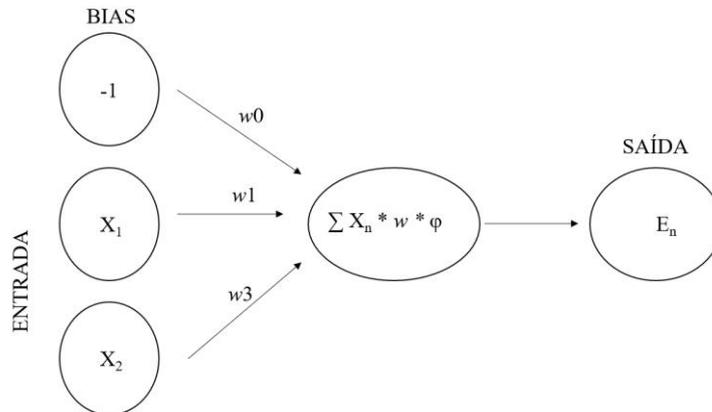
Modelo I - este modelo incluiu todas as variáveis com correlação significativa ($p < 0,05$) (Apêndice – Tabela 9), que foram SM, PPT01-PPT10, ET01-ET10, WB01-WB10

Modelo II – este modelo incluiu as variáveis com coeficiente de Pearson alto ou muito alto ($0,6 \leq |r| < 0,8$ ou $0,8 \leq |r| < 1$, respectivamente), conforme sugerido por Bisquerra *et al.* (2004) com correlação significativa ($p < 0,05$), que foram SM, ET01-ET10 (Apêndice – Tabela 9).

Desenvolve-se modelos de percepção em multicamadas, comumente aplicados em estudos hidroambientais (Rumelhart, 1986), que possuem uma estrutura de três camadas:

camada de entrada, camada de saída e camada oculta (Figura 22). Utilizou-se a tangente hiperbólica para ativar a camada oculta e a função identidade para ativar a camada de saída, e incluímos um viés, conforme metodologia adotada por Sari *et al.* (2017).

Figura 22 - Esquemática do modelo multicamada de rede neural



Fonte: Próprio autor.

Os modelos foram treinados e testados com diferentes partes do conjunto de dados (validação cruzada). A escolha dos dados a serem incluídos em cada subconjunto de dados (treinamento e teste) foi feita de forma que cada um incluísse todos os domínios das variáveis e contivesse os valores extremos para calibração de forma a ser representativo de todo o espaço amostral disponível.

8.2.4 Análise de desempenho dos modelos

Para analisar o desempenho dos modelos, comparou-se os resultados estimados com os observados com coeficientes que medem a tendência média dos valores simulados serem maiores ou menores do que os observados: coeficiente de Nash–Sutcliffe (NS) (1970) como sugerido por Teixeira *et al.* (2020) e Moriasi *et al.* (2015), e viés de porcentagem (PBIAS) (Gupta *et al.*, 1999) de acordo com Moriasi *et al.* (2015): $NS > 0,8$ e $PBIAS < 10$ —Excelente; $0,70 < NS \leq 0,8$ e $10 \leq PBIAS < 15$ —Bom; $0,45 < NS \leq 0,7$ e $15 \leq PBIAS < 20$ —Satisfatório; e $NS \leq 0,45$ e $PBIAS \leq 20$ – Não satisfatório

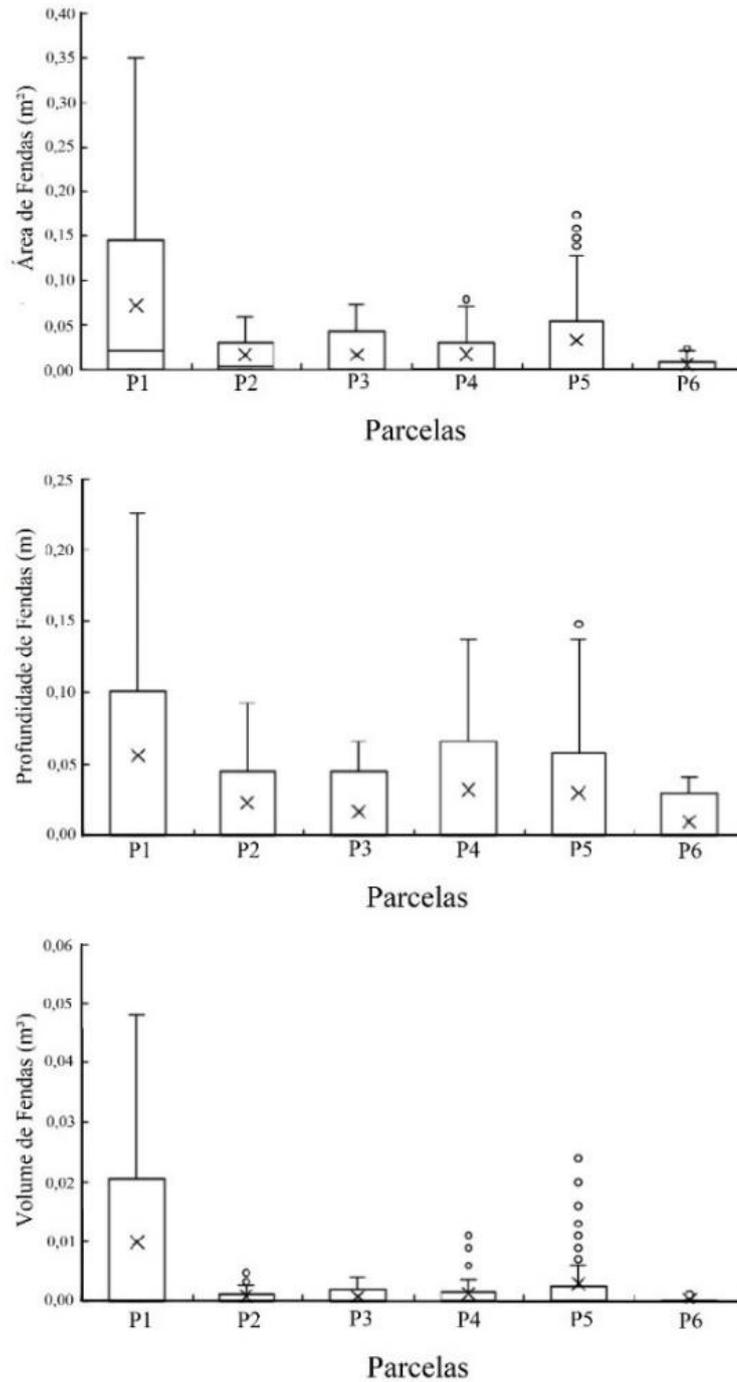
8.3 Resultados e discussões

8.3.1 Variabilidade espacial e temporal das características morfométricas das fendas

As características morfométricas das fendas do solo (área, profundidade e volume) (Figura 23) expressaram variabilidade ao longo do período estudado. A variabilidade foi associada à sazonalidade climática. No período seco ocorreu a contração das argilas e formação

de fendas no solo, enquanto no início da estação chuvosa as argilas se expandiram e as fendas foram seladas (Bullard *et al.*, 2018). As parcelas P1, P4 e P5 registraram as maiores médias para profundidade, área e volume de fendas, bem como a maior variabilidade.

Figura 23 - Características descritivas morfométricas de fendas no Vertissolo estudado - área, profundidade e volume



Fonte: Próprio autor.

Durante o período de estudo todas as fendas selaram superficialmente em algum ponto (Figura 23), sendo atribuído valor zero às variáveis de área, profundidade e volume. Os maiores

valores de área, profundidade e volume foram registrados na Parcela P1, mais próxima ao exutório (Figura 20). Embora a parcela P1 não tenha apresentado o maior teor de argila, ela apresentou o maior limite de plasticidade, o que influenciou diretamente no processo de expansão/contração, tanto na magnitude de ocorrência quanto na velocidade dos processos (Rayhani *et al.*, 2008; Cheng *et al.*, 2021) quando comparada com a parcela outras parcelas.

8.3.2 Performance dos modelos

Na determinação da profundidade das fendas no solo, o Modelo II apresentou excelente desempenho tanto na calibração quanto na validação para todas as parcelas (Tabela 8), segundo os critérios de classificação de Moriasi *et al.* (2015). O Modelo I também apresentou excelente desempenho para as parcelas P1, P2, P4 e P5 e desempenho satisfatório para as parcelas P3 e P6 tanto na calibração quanto na validação. O menor teor de argila nas parcelas P3 e P6 (Tabela 6) reduziu o grau de fechamento das fendas, sendo então governado pela plasticidade do solo, o que determina diretamente o potencial de expansão e contração do solo (Rayhani; Yanfuk; Fakher, 2008), com maior impacto no modelo e desempenho.

Tabela 8 - Desempenho dos modelos para determinação de características morfométricas

Profundidade de fendas no solo					
Parcelas	Modelos	NS		PBIAS	
		Calibração	Validação	Calibração	Validação
P1	Modelo I	0,94	0,91	0,62	0,97
	Modelo II	0,96	0,98	0,40	0,28
P2	Modelo I	0,70	0,77	1,29	0,88
	Modelo II	0,92	1,86	0,34	0,51
P3	Modelo I	0,73	0,57	0,82	0,66
	Modelo II	0,86	0,82	0,45	0,51
P4	Modelo I	0,88	0,88	0,68	0,79
	Modelo II	0,93	0,94	0,40	0,40
P5	Modelo I	0,82	0,83	1,22	0,84
	Modelo II	0,83	0,84	1,20	1,19
P6	Modelo I	0,65	0,55	0,56	0,66
	Modelo II	0,75	0,76	0,80	0,77

Continuação da Tabela 8

		Área de fendas no solo			
Parcelas	Modelos	NS		PBIAS	
		Calibração	Validação	Calibração	Validação
P1	Modelo I	0,80	0,79	2,36	2,42
	Modelo II	0,83	0,82	2,03	2,07
P2	Modelo I	0,70	0,47	0,44	1,92
	Modelo II	0,80	0,69	0,90	1,09
P3	Modelo I	0,68	0,52	1,01	1,30
	Modelo II	0,84	0,82	0,49	0,50
P4	Modelo I	0,82	0,68	0,53	2,45
	Modelo II	0,71	0,46	0,87	2,18
P5	Modelo I	0,95	0,83	0,35	1,29
	Modelo II	0,95	0,83	0,35	1,26
P6	Modelo I	0,66	0,52	0,38	1,47
	Modelo II	0,65	0,46	0,38	1,50
		Volume de fendas no solo			
Parcelas	Modelos	NS		PBIAS	
		Calibração	Validação	Calibração	Validação
P1	Modelo I	0,82	0,86	0,44	0,88
	Modelo II	0,80	0,64	0,47	0,28
P2	Modelo I	0,74	0,62	0,07	0,09
	Modelo II	0,88	0,87	0,03	0,03
P3	Modelo I	0,63	0,69	0,07	0,05
	Modelo II	0,80	0,82	0,04	0,03
P4	Modelo I	0,85	0,92	0,07	0,04
	Modelo II	0,82	0,86	0,04	0,02
P5	Modelo I	0,81	0,84	0,10	0,06
	Modelo II	0,86	0,94	0,16	0,06
P6	Modelo I	0,38	0,32	0,09	0,04
	Modelo II	0,42	0,36	0,08	0,04

Fonte: Próprio autor.

O Modelo I apresentou desempenho melhor (excelente) que o Modelo II (bom) para a variável área (Tabela 8) nas Parcelas P1 e P5, e desempenho satisfatório para as demais parcelas, que apresentaram desempenho excelente no Modelo I e bom desempenho quando usando o modelo I.

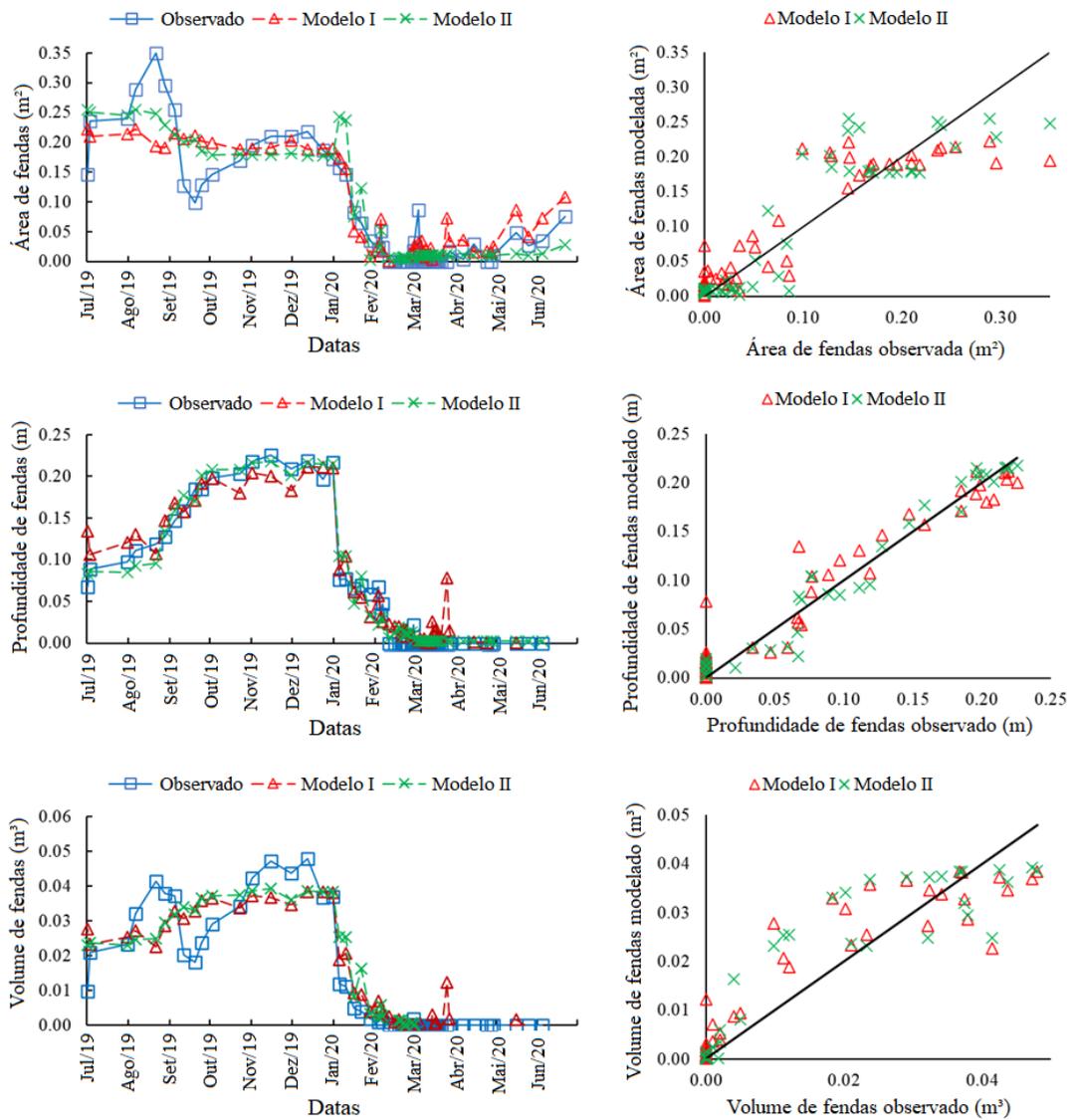
Ainda na Tabela 8, observou-se que para a variável área nas Parcelas P1 e P5, o Modelo II apresentou desempenho classificado como excelente segundo Moriasi *et al.* (2015), enquanto o Modelo I apresentou um bom desempenho. Para as demais parcelas, ambos os modelos apresentaram desempenhos satisfatórios. As parcelas P1 e P5 desenvolveram as maiores áreas de fendas (Figura 23), aumentando a conectividade solo-fenda (Xiong *et al.*, 2010) e interações com fatores externos, levando a um melhor desempenho dos modelos.

De todas as características morfométricas de fendas no solo (profundidade, área e volume) estimadas pelos dois modelos (Tabela 8), o volume de fendas na Parcela P6 foi a única característica que em ambos os modelos apresentou desempenho não satisfatório. Para as demais parcelas, os dois modelos apresentaram desempenho satisfatório. A parcela P6 apresentou maiores teores de areia e menores teores de argila e menores áreas, profundidades e volumes de fendas, revelando uma rede de fendas menor, o que pode ter influenciado na precisão dos modelos (Vogel *et al.*, 2005).

8.3.3 Características morfométricas das fendas do solo

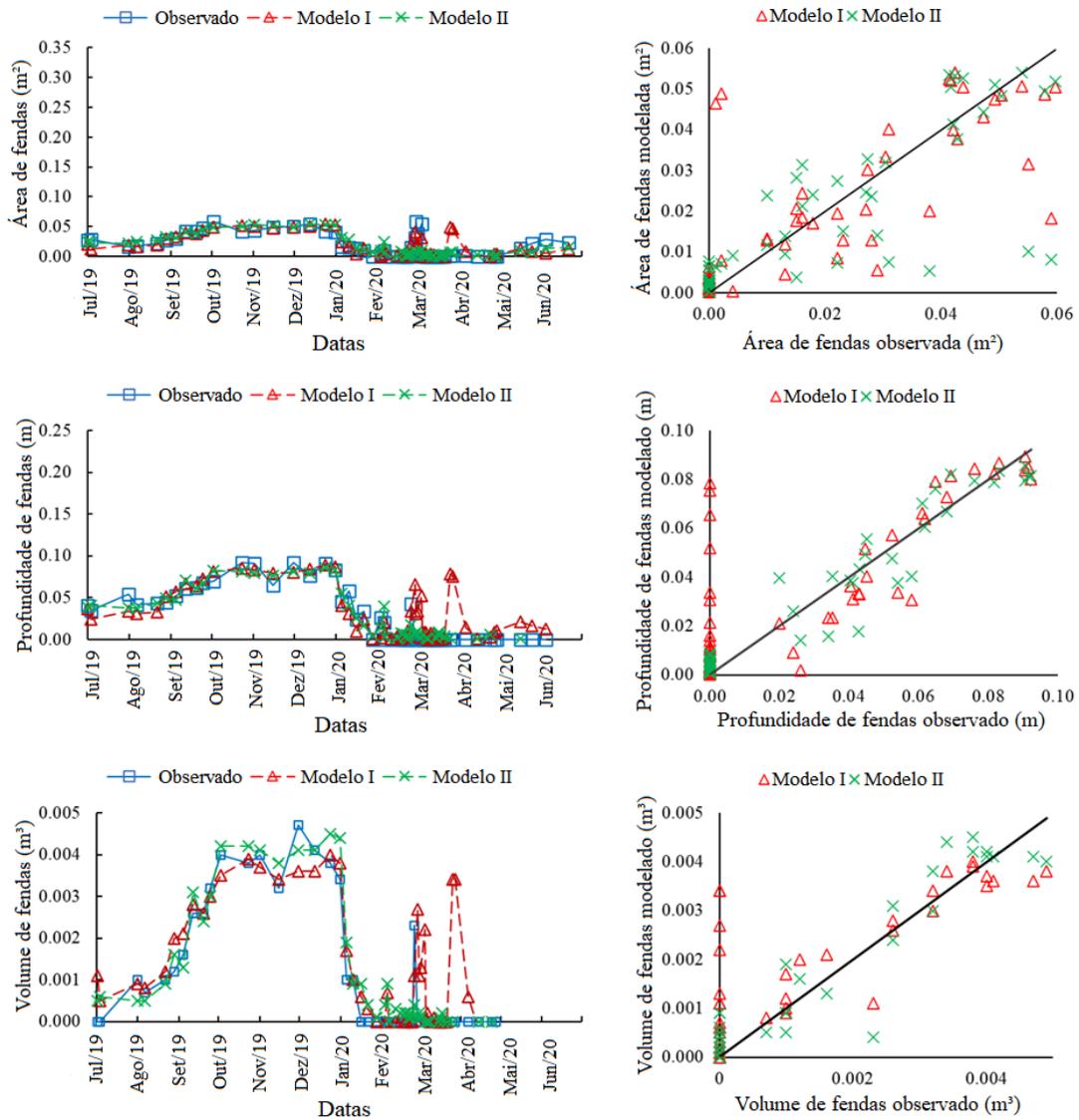
Ambos os modelos previram a profundidade das fendas com mais precisão do que as outras variáveis em todas as parcelas (P1–P6), como pode ser observado em (Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29). Embora os modelos tenham apresentado desempenho satisfatório nas parcelas com maiores teores de areia (P3 e P6 na Tabela 4), ocorreu alta dispersão dos dados ao comparar as saídas dos modelos com os dados observados.

Figura 24 - Características morfométricas de fendas na Parcela 1: área, profundidade e volume - observadas e modeladas



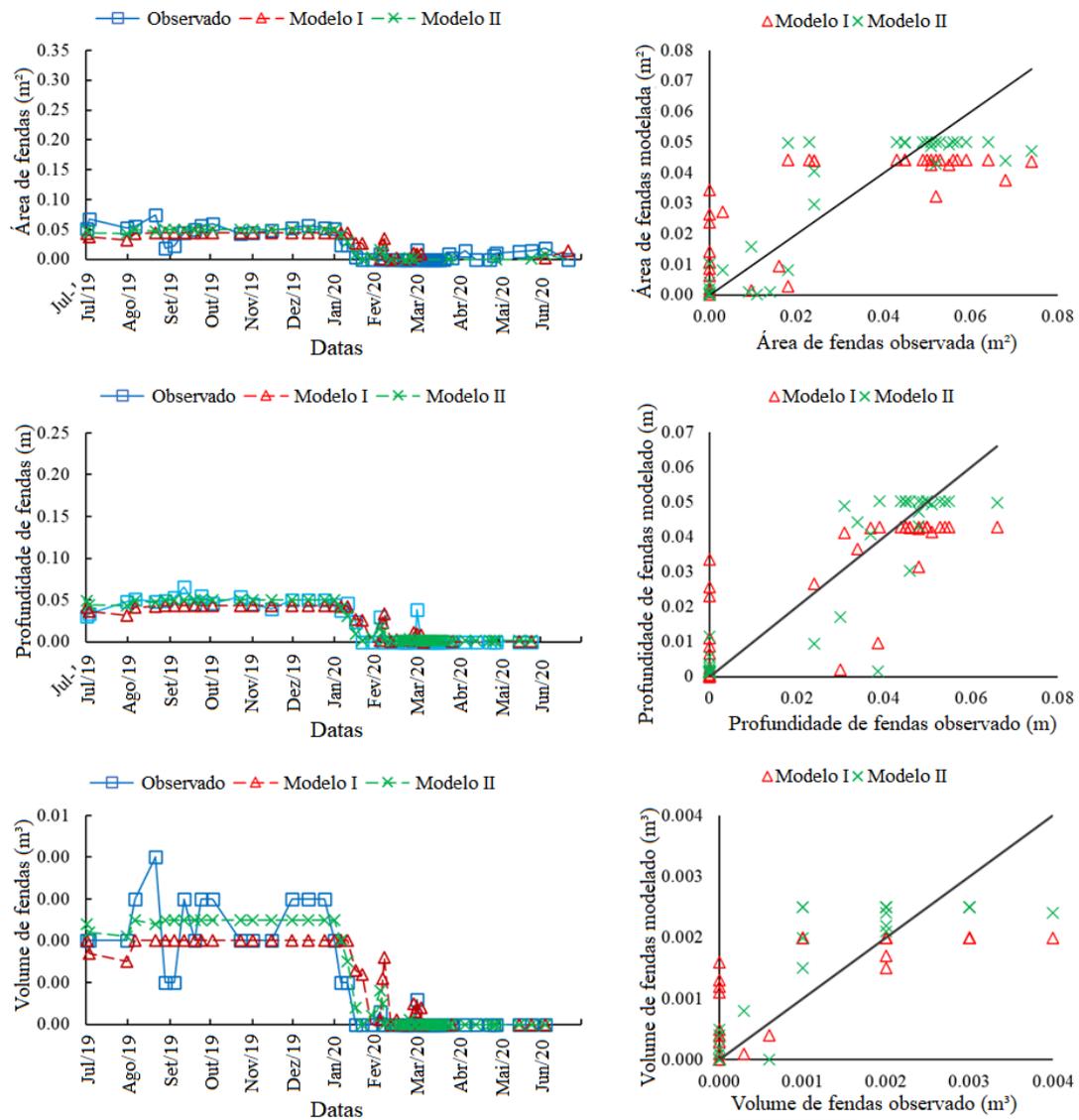
Fonte: Próprio autor.

Figura 25 - Características morfométricas de fendas na Parcela 2: área, profundidade e volume - observadas e modeladas



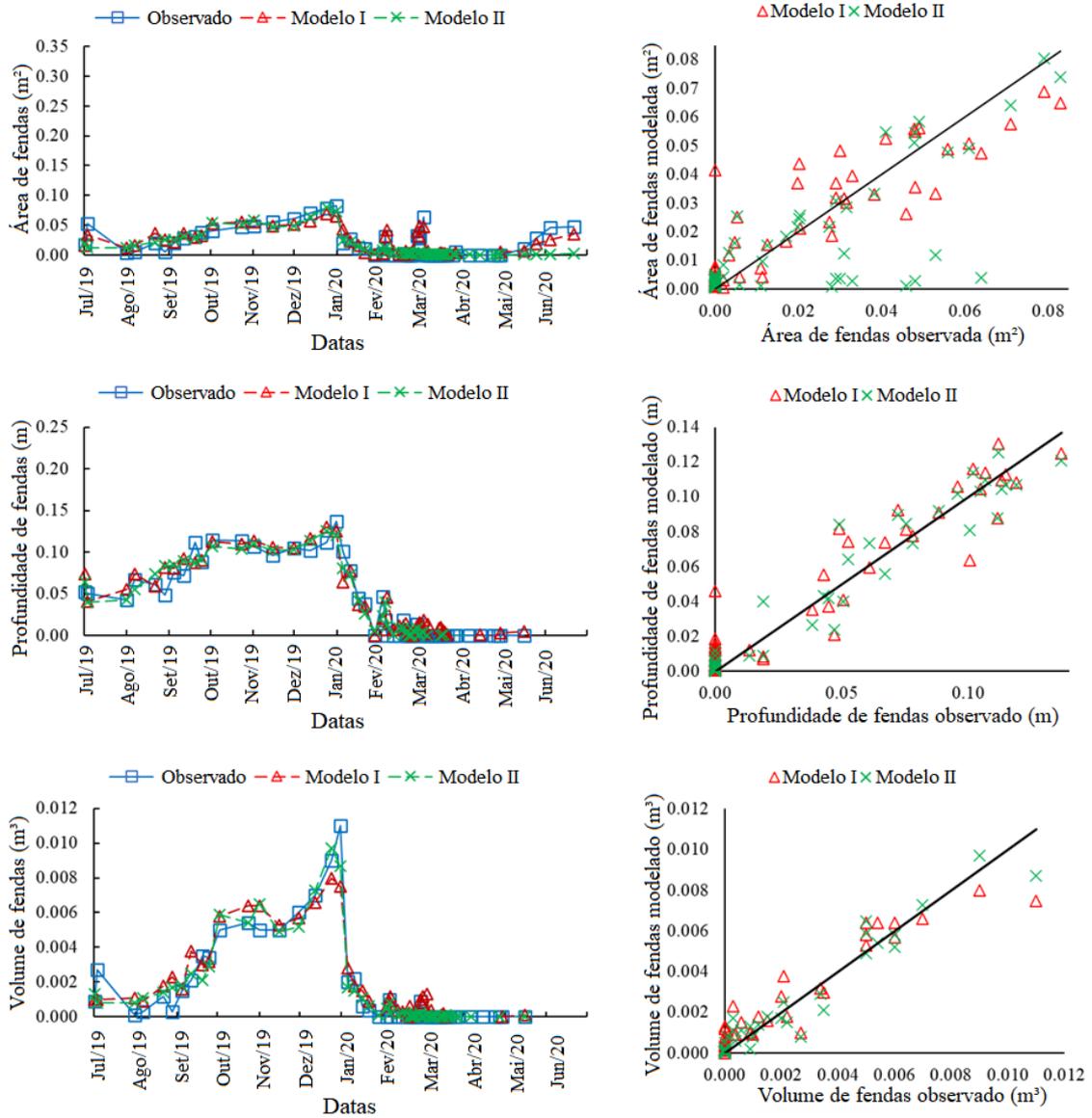
Fonte: Próprio autor.

Figura 26 - Características morfométricas de fendas na Parcela 3: área, profundidade e volume - observadas e modeladas



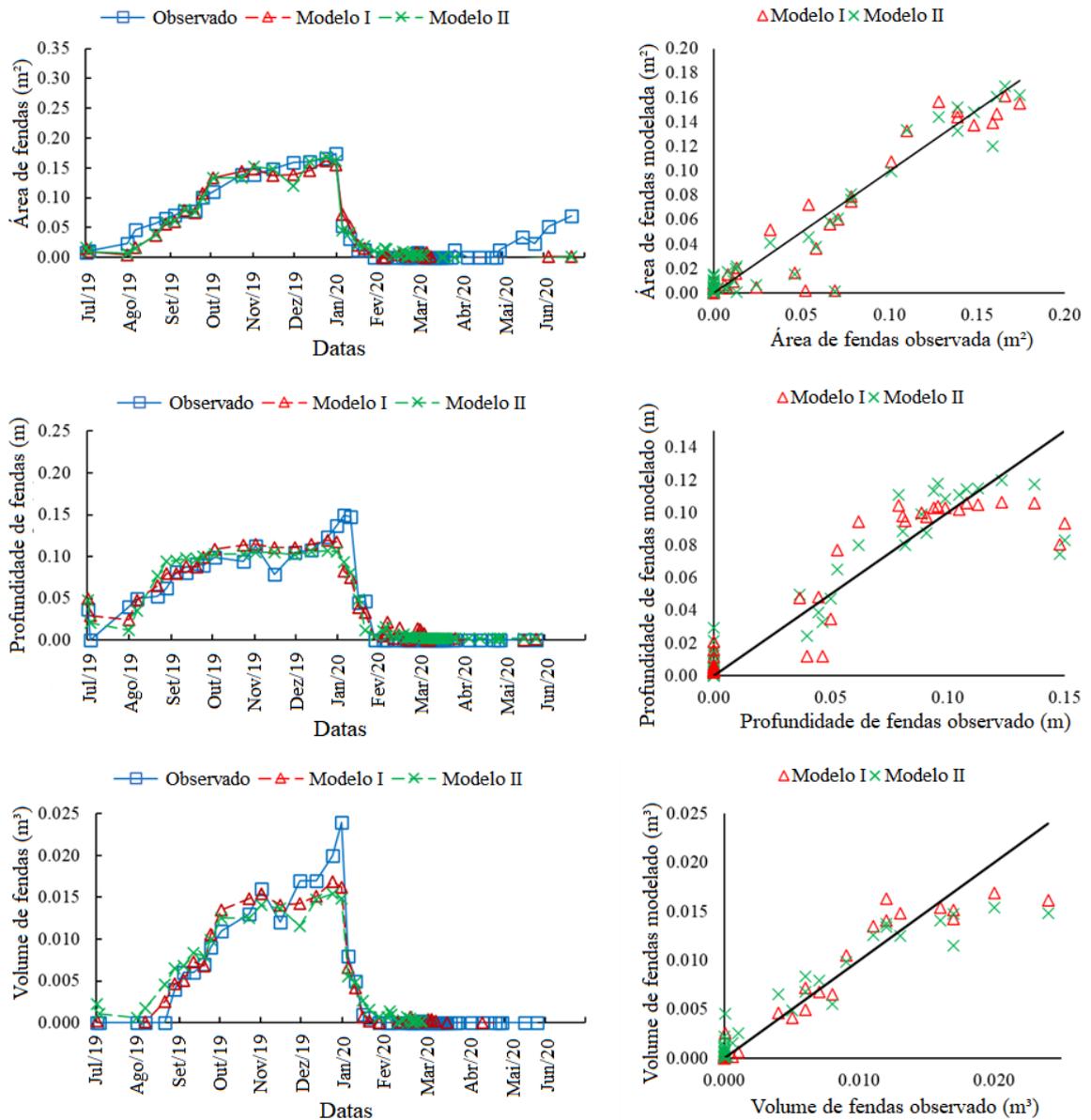
Fonte: Próprio autor.

Figura 27 - Características morfométricas de fendas na Parcela 4: área, profundidade e volume - observadas e modeladas



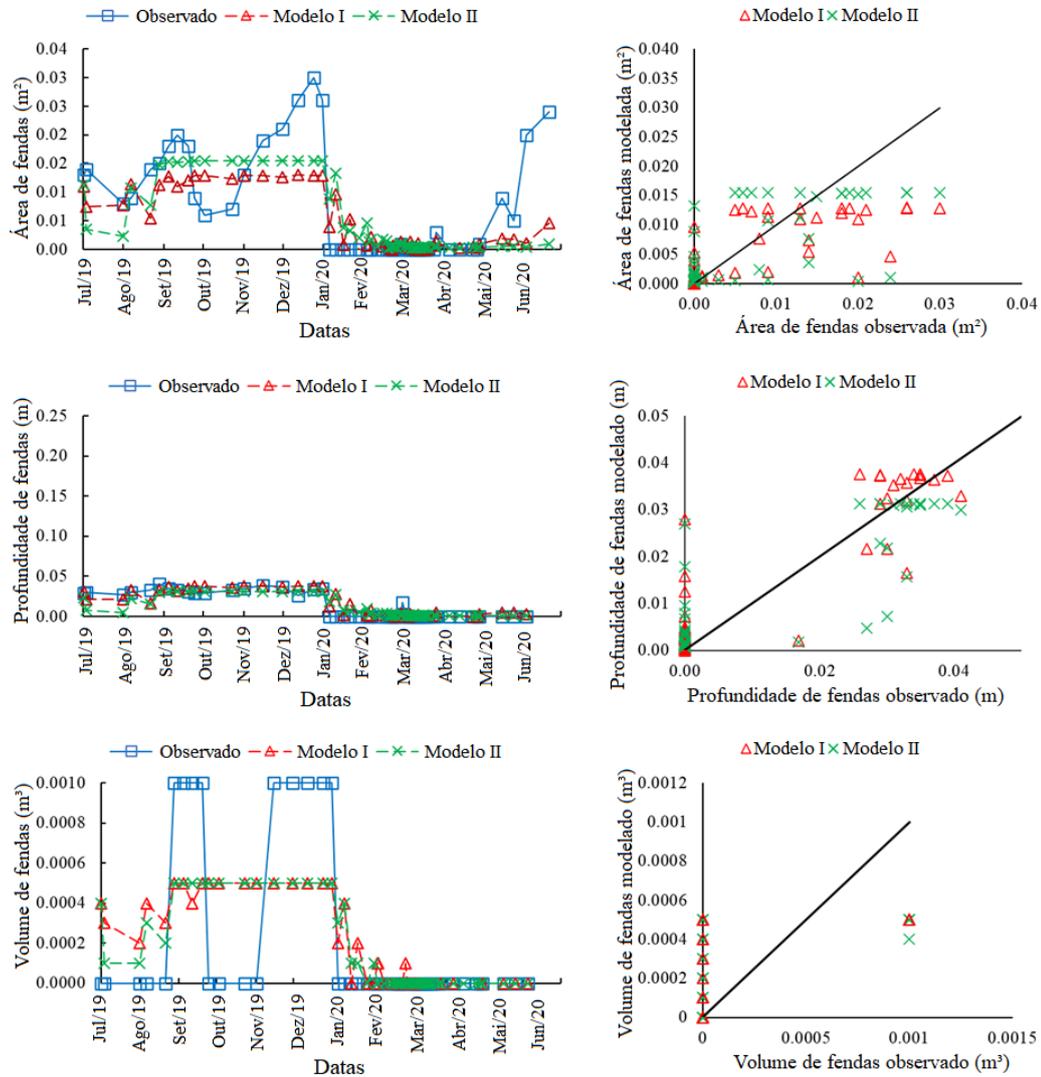
Fonte: Próprio autor.

Figura 28 - Características morfométricas de fendas na Parcela 5: área, profundidade e volume - observadas e modeladas



Fonte: Próprio autor.

Figura 29 - Características morfométricas de fendas na Parcela 6: área, profundidade e volume - observadas e modeladas



Fonte: Próprio autor.

As estimativas da área das fendas nas parcelas estudadas (Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29) com ambos os modelos apresentaram dispersões inferiores às observadas em campo nas Parcelas P1 e P5, que apresentaram os maiores índices de plasticidade. Os processos de expansão/contração (Rayhani; Yanfuk; Fakher, 2008; Wang *et al.*, 2018), portanto, também pode ocorrer uma resposta mais rápida às variações climáticas. O maior teor de areia nas Parcelas P3 e P6 diminuiu a adesão com a água quando comparado aos solos com maior teor de argila (Cheng *et al.*, 2021), diminuindo também as forças de coesão (Rayhani; Yanfuk; Fakher, 2008), com consequentes respostas distintas às condições climáticas

quando comparados a parcelas com maior teor de argila (Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29). Para as demais parcelas (P2, P3, P4 e P6), houve maior dispersão das saídas dos modelos em relação aos valores observados. Nota-se também que na Parcela P4, o Modelo II subestimou os valores observados quando comparado à saída do Modelo I, sugerindo uma influência do teor de argila na resposta do modelo.

A evolução temporal do comportamento das fissuras é acompanhada por ambos os modelos Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29, com exceção da Parcela P6, para o qual ambos os modelos não seguiram estimar as variações ao longo do tempo e sim estimam patamar de volume constante, embora haja variações observadas em campo. Devido ao maior teor de areia nesta parcela, a superfície do solo estava sob maior estresse causado pela evaporação e consequente redução da umidade do solo. Esses processos têm influência na capacidade de infiltração/taxa de infiltração, o que afetará a formação, orientação e distribuição das fendas no solo, bem como o selamento superficial das fendas (Dinka *et al.*, 2013; Sadeghi *et al.*, 2020).

8.4 Conclusões

Os modelos de rede neural desenvolvidos neste estudo, baseados em dados climáticos para prever as características morfométricas de fendas em um solo argiloso expansivo, determinaram bem a área e a profundidade das fendas em parcelas com teor de argila acima de 30%. Os modelos tiveram melhor desempenho quando as variáveis climáticas de entrada apresentaram correlações altas ou muito altas com as características morfométricas das fendas no solo. As maiores dispersões dos modelados em relação aos valores observados para todas as características morfométricas das fendas (área, profundidade e volume) foram em parcelas com maiores teores de areia (acima de 40%). O modelo é adequado para ser aplicado em regiões com solos mais pesados e com maiores teores de argila.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e à Fundação Estadual de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) do Ceará pelo seu apoio financeiro para esta pesquisa.

Apêndice

Tabela 9 - Correlação entre características ambientais externas e características morfométricas de fendas

Variáveis	Parcela 1			Parcela 2			Parcela 3			Parcela 4			Parcela 5			Parcela 6		
	Área	Prof	Vol															
SM	-0.89**	-0.90**	-0.87**	-0.84**	-0.89**	-0.75**	-0.85**	-0.88**	-0.83**	-0.75**	-0.88**	-0.71**	-0.77**	-0.81**	-0.69**	-0.74**	-0.82**	-0.63**
ET1	0.61**	0.78**	0.72**	0.72**	0.76**	0.74**	0.66**	0.67**	0.68**	0.65**	0.76**	0.71**	0.77**	0.71**	0.73**	0.70**	0.70**	0.61**
ET2	0.63**	0.87**	0.79**	0.79**	0.84**	0.82**	0.71**	0.72**	0.72**	0.76**	0.84**	0.81**	0.85**	0.79**	0.83**	0.74**	0.74**	0.60**
ET3	0.67**	0.89**	0.83**	0.82**	0.86**	0.84**	0.75**	0.76**	0.75**	0.78**	0.85**	0.82**	0.87**	0.79**	0.83**	0.77**	0.78**	0.61**
ET4	0.67**	0.90**	0.82**	0.83**	0.87**	0.85**	0.74**	0.76**	0.75**	0.78**	0.88**	0.83**	0.88**	0.82**	0.84**	0.75**	0.77**	0.61**
ET5	0.68**	0.90**	0.83**	0.84**	0.88**	0.87**	0.74**	0.78**	0.75**	0.80**	0.89**	0.85**	0.89**	0.83**	0.86**	0.75**	0.77**	0.61**
ET6	0.67**	0.91**	0.83**	0.86**	0.89**	0.88**	0.74**	0.78**	0.76**	0.83**	0.90**	0.87**	0.91**	0.84**	0.88**	0.76**	0.77**	0.62**
ET7	0.67**	0.91**	0.83**	0.86**	0.90**	0.89**	0.75**	0.79**	0.77**	0.83**	0.90**	0.88**	0.92**	0.85**	0.89**	0.77**	0.78**	0.63**
ET8	0.69**	0.93**	0.84**	0.87**	0.91**	0.90**	0.77**	0.80**	0.79**	0.84**	0.91**	0.88**	0.92**	0.85**	0.89**	0.78**	0.79**	0.63**
ET9	0.68**	0.92**	0.84**	0.86**	0.90**	0.90**	0.75**	0.79**	0.77**	0.84**	0.91**	0.88**	0.92**	0.85**	0.89**	0.77**	0.78**	0.63**
ET10	0.67**	0.92**	0.83**	0.85**	0.90**	0.89**	0.75**	0.79**	0.76**	0.84**	0.90**	0.88**	0.92**	0.84**	0.89**	0.76**	0.77**	0.63**
PPT1	-0.37**	-0.35**	-0.35**	-0.39**	-0.41**	-0.33**	-0.35**	-0.38**	-0.34**	-0.33**	-0.37**	-0.29**	-0.31**	-0.34**	-0.27**	-0.29**	-0.34**	-0.29**
PPT2	-0.51**	-0.48**	-0.49**	-0.52**	-0.52**	-0.45**	-0.48**	-0.50**	-0.47**	-0.45**	-0.47**	-0.39**	-0.42**	-0.44**	-0.37**	-0.40**	-0.47**	-0.29**
PPT3	-0.56**	-0.54**	-0.54**	-0.55**	-0.57**	-0.47**	-0.52**	-0.55**	-0.50**	-0.48**	-0.51**	-0.42**	-0.45**	-0.48**	-0.40**	-0.43**	-0.51**	-0.31**
PPT4	-0.61**	-0.59**	-0.58**	-0.58**	-0.59**	-0.51**	-0.55**	-0.59**	-0.53**	-0.50**	-0.54**	-0.45**	-0.49**	-0.51**	-0.43**	-0.46**	-0.55**	-0.34**
PPT5	-0.63**	-0.61**	-0.59**	-0.60**	-0.61**	-0.52**	-0.57**	-0.61**	-0.55**	-0.52**	-0.56**	-0.46**	-0.50**	-0.53**	-0.44**	-0.47**	-0.55**	-0.34**
PPT6	-0.64**	-0.62**	-0.61**	-0.61**	-0.63**	-0.53**	-0.61**	-0.65**	-0.59**	-0.54**	-0.59**	-0.48**	-0.51**	-0.55**	-0.45**	-0.50**	-0.58**	-0.36**
PPT7	-0.65**	-0.63**	-0.62**	-0.61**	-0.63**	-0.54**	-0.62**	-0.66**	-0.61**	-0.53**	-0.60**	-0.49**	-0.53**	-0.57**	-0.47**	-0.52**	-0.60**	-0.37**
PPT8	-0.67**	-0.65**	-0.64**	-0.61**	-0.64**	-0.54**	-0.64**	-0.68**	-0.62**	-0.54**	-0.62**	-0.50**	-0.54**	-0.58**	-0.48**	-0.53**	-0.61**	-0.38**
PPT9	-0.68**	-0.66**	-0.65**	-0.61**	-0.64**	-0.54**	-0.65**	-0.68**	-0.63**	-0.54**	-0.62**	-0.50**	-0.55**	-0.60**	-0.49**	-0.54**	-0.62**	-0.39**
PPT10	-0.68**	-0.67**	-0.65**	-0.61**	-0.64**	-0.54**	-0.66**	-0.69**	-0.64**	-0.55**	-0.64**	-0.51**	-0.56**	-0.61**	-0.50**	-0.56**	-0.63**	-0.40**
WB1	-0.41**	-0.40**	-0.40**	-0.44**	-0.46**	-0.38**	-0.39**	-0.43**	-0.38**	-0.38**	-0.43**	-0.34**	-0.36**	-0.39**	-0.32**	-0.34**	-0.39**	-0.25**
WB2	-0.55**	-0.54**	-0.55**	-0.57**	-0.59**	-0.52**	-0.53**	-0.55**	-0.52**	-0.51**	-0.53**	-0.46**	-0.49**	-0.50**	-0.44**	-0.46**	-0.53**	-0.34**
WB3	-0.61**	-0.61**	-0.60**	-0.61**	-0.63**	-0.54**	-0.57**	-0.61**	-0.56**	-0.54**	-0.58**	-0.49**	-0.53**	-0.54**	-0.47**	-0.49**	-0.58**	-0.36**
WB4	-0.65**	-0.65**	-0.64**	-0.64**	-0.66**	-0.58**	-0.60**	-0.64**	-0.59**	-0.57**	-0.61**	-0.52**	-0.56**	-0.58**	-0.50**	-0.52**	-0.60**	-0.39**
WB5	-0.67**	-0.68**	-0.65**	-0.66**	-0.68**	-0.59**	-0.62**	-0.67**	-0.61**	-0.58**	-0.63**	-0.53**	-0.57**	-0.59**	-0.51**	-0.53**	-0.61**	-0.39**
WB6	-0.68**	-0.69**	-0.66**	-0.68**	-0.70**	-0.60**	-0.66**	-0.71**	-0.64**	-0.61**	-0.66**	-0.55**	-0.59**	-0.62**	-0.53**	-0.56**	-0.64**	-0.41**
WB7	-0.69**	-0.70**	-0.68**	-0.68**	-0.70**	-0.61**	-0.68**	-0.71**	-0.66**	-0.60**	-0.68**	-0.56**	-0.61**	-0.64**	-0.55**	-0.58**	-0.66**	-0.43**
WB8	-0.71**	-0.72**	-0.70**	-0.69**	-0.71**	-0.62**	-0.69**	-0.73**	-0.68**	-0.62**	-0.70**	-0.58**	-0.63**	-0.66**	-0.56**	-0.60**	-0.68**	-0.44**
WB9	-0.72**	-0.74**	-0.71**	-0.69**	-0.72**	-0.63**	-0.70**	-0.74**	-0.69**	-0.62**	-0.70**	-0.58**	-0.64**	-0.67**	-0.57**	-0.61**	-0.68**	-0.45**
WB10	-0.72**	-0.75**	-0.72**	-0.69**	-0.73**	-0.63**	-0.71**	-0.75**	-0.70**	-0.63**	-0.72**	-0.60**	-0.66**	-0.68**	-0.58**	-0.62**	-0.69**	-0.46**

área (m²); Prof - profundidade (m); vol - volume (m³); SM - umidade do solo (%); ET1-ET10 - evapotranspiração potencial acumulada de 1 a 10 dias (mm dia⁻¹); PPT1-PPT10 - precipitação acumulada de 1 a 10 dias (mm); WB1-WB10 - balanço hídrico simplificado acumulada de 1 a 10 dias (mm); **Valores significativos ao nível de 5%.

REFERÊNCIAS

- AL-JEZNAWI, D., SANCHEZ, M., & AL-TAIE, A. J. Using image analysis technique to study the effect of boundary and environment conditions on soil cracking mechanism. *Geotechnical and Geological Engineering*, v.39, p.25-36, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01376-5>
- AQUINO, D. N., DE ANDRADE, E. M., DE ALMEIDA CASTANHO, A. D., JÚNIOR, L. R. P., & DE QUEIROZ PALÁCIO, H. A. Belowground carbon and nitrogen on a thinned and un-thinned seasonally dry tropical forest. *American Journal of Plant Sciences*, v.8 (09), 2083-2101, 2017. <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.89140>
- BAER, J. U., KENT, T. F., & ANDERSON, S. H. Image analysis and fractal geometry to characterize soil desiccation cracks. *Geoderma*, v.154, p.153-163, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.008>
- BAUER, T., & STRAUSS, P. A rule-based image analysis approach for calculating residues and vegetation cover under field conditions. *Catena*, v.113, p.363-369, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.022>
- BENEDETTI, M. M., SPAROVEK, G., COOPER, M., CURI, N., & CARVALHO FILHO, A. D. Representatividade e potencial de utilização de um banco de dados de solos do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.2591-2600, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600036>
- BISQUERRA, R.; SARRIERA, J.C.; MARTÍNEZ, F. Introdução à Estatística: Enfoque informático com o pacote estatístico SPSS. Porto Alegre: Artmed, 2004. 254 p
- BORDOLOI, S., NI, J., & NG, C. W. W. Soil desiccation cracking and its characterization in vegetated soil: A perspective review. *Science of the Total Environment*, v.729, e138760, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138760>
- BULLARD, J. E., OCKELFORD, A., STRONG, C. L., & AUBAULT, H. Impact of multi-day rainfall events on surface roughness and physical crusting of very fine soils. *Geoderma*, v.313, p.181-192, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.038>
- CAMPOS, D. A., & DE ANDRADE, E. M. Seasonal trend of climate variables in an area of the Caatinga phytogeographic domain. *Revista Agro@ mbiente On-line*, v.15, p.1-10, 2021. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v15i0.6833>
- CHENG, Q., TANG, C. S., XU, D., ZENG, H., & SHI, B. Water infiltration in a cracked soil considering effect of drying-wetting cycles. *Journal of Hydrology*, v.593, e125640, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125640>
- DAI, A. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature climate change*, v.3, p.52-58, 2013. <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>

DINKA, T. M., MORGAN, C. L., MCINNES, K. J., KISHNÉ, A. S., & HARMEL, R. D. Shrink–swell behavior of soil across a Vertisol catena. *Journal of Hydrology*, v.476, p.352-359, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.002>

DECARLO, K. F., & SHOKRI, N. Effects of substrate on cracking patterns and dynamics in desiccating clay layers. *Water Resources Research*, v.50, p.3039-3051, 2014. <https://doi.org/10.1002/2013WR014466>

DOU, Y., QUAN, J., JIA, X., WANG, Q., & LIU, Y. Near-Surface Warming Reduces Dew Frequency in China. *Geophysical Research Letters*, v.48, e2020GL091923, 2021. <https://doi.org/10.1029/2020GL091923>

DUPDAL, R. A. H. E., & ESWARAN, H. Distribution, properties and classification of Vertisols. *Vertisols: Their distribution, properties, classification and management*, v.1, p.1-22, 1988.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: EMBRAPA. 353 p. 2013.

FAO - AGRICULTURE ORGANIZATION FOR THE UNITED NATIONS. *World reference base for soil resources* (Nº. 84). Food & Agriculture Org. 2014.

FERREIRA, S. R. D. M., ARAÚJO, A. G. D. D., BARBOSA, F. A. S., SILVA, T. C. R., & BEZERRA, I. M. D. L. Analysis of changes in volume and propagation of cracks in expansive soil due to changes in water content. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.44, p.1-10, 2020. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20190169>

FRY, J. E., & GUBER, A. K. Temporal stability of field-scale patterns in soil water content across topographically diverse agricultural landscapes. *Journal of Hydrology*, v.580, e124260, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124260>

GUPTA, H. V., SOROOSHIAN, S., & YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of hydrologic engineering*, v.4, p.135-143, 1999.

GUERREIRO, M. J. S., ANDRADE, E. M., ABREU, I., & LAJINHA, T. Long-term variation of precipitation indices in Ceará State, Northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, v.33, p.2929-2939, 2013. <https://doi.org/10.1002/joc.3645>

GUERREIRO, M. S., MAIA DE ANDRADE, E., PALÁCIO, H. A. D. Q., BRASIL, J. B., & FILHO, J. C. R. Enhancing Ecosystem Services to Minimize Impact of Climate Variability in a Dry Tropical Forest with Vertisols. *Hydrology*, v.8, p.46-55, 2021. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010046>

GUERREIRO, M. S., DE ANDRADE, E. M., DE SOUSA, M. M. M., BRASIL, J. B., FILHO, J. C. R., & DE QUEIROZ PALÁCIO, H. A. Contribution of non-rainfall water input to surface soil moisture in a tropical dry forest. *Hydrology*, v.9, p.102-112, 2022. <https://doi.org/10.3390/hydrology9060102>

GUNEY, Y., SARI, D., CETIN, M., & TUNCAN, M. Impact of cyclic wetting–drying on swelling behavior of lime-stabilized soil. *Building and environment*, v.42, p.681-688, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.035>

HARGREAVES, G. H., & SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, v.1, p.96-99, 1985. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>

HE, M., XIONG, X., WANG, L., HOU, D., BOLAN, N. S., OK, Y. S., ... & TANG, D. C. A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils. *Journal of hazardous materials*, v.414, e125378, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125378>

KISHNÉ, A. S., MORGAN, C. L., GE, Y., & MILLER, W. L. Antecedent soil moisture affecting surface cracking of a Vertisol in field conditions. *Geoderma*, v.157, p.109-117, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.03.020>

KUTÍLEK, M., & NIELSEN, D. R. *Soil hydrology: textbook for students of soil science, agriculture, forestry, geoecology, hydrology, geomorphology and other related disciplines*. Catena Verlag, 1994.

LIMA JUNIOR, J. C. D., ARRAES, F. D. D., OLIVEIRA, J. B. D., NASCIMENTO, F. A. L. D., & MACÊDO, K. G. D. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. *Revista Ciência Agronômica*, v.47, p.447-454, 2016. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160054>

LIU, C., TANG, C. S., SHI, B., & SUO, W. B. Automatic quantification of crack patterns by image processing. *Computers & Geosciences*, v.57, p.77-80, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.04.008>

MILLER, W. L., KISHNÉ, A. S., & MORGAN, C. L. Vertisol morphology, classification, and seasonal cracking patterns in the Texas Gulf coast prairie. *Soil survey horizons*, v.51, p.10-16, 2010. <https://doi.org/10.2136/sh2010.1.0010>

MOHANTY, M., SINHA, N. K., SOMASUNDARAM, J., MCDERMID, S. S., PATRA, A. K., SINGH, M., ... & CHAUDHARI, S. K. Soil carbon sequestration potential in a Vertisol in central India-results from a 43-year long-term experiment and APSIM modeling. *Agricultural Systems*, v.184, e102906, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102906>

MORIASI, D. N., GITAU, M. W., PAI, N., & DAGGUPATI, P. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, v.58, p.1763-1785, 2015. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>

MORRIS, P. H., GRAHAM, J., & WILLIAMS, D. J. Cracking in drying soils. *Canadian Geotechnical Journal*, v.2, p.263-277, 1992. <https://doi.org/10.1139/t92-030>

LU, Y., LIU, S., WENG, L., WANG, L., LI, Z., & XU, L. Fractal analysis of cracking in a clayey soil under freeze–thaw cycles. *Engineering Geology*, v.208, p.93-99, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.023>

NASH, J. E., & SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, v.10, p.282-290, 1970. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

PAL, D. K., BHATTACHARYYA, T., CHANDRAN, P., RAY, S. K., SATYAVATHI, P. L. A., DURGE, S. L., ... & MAURYA, U. K. Vertisols (cracking clay soils) in a climosequence of Peninsular India: evidence for Holocene climate changes. *Quaternary International*, v.1, p.6-21, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.12.013>

QI, W., ZHANG, Z. Y., & WANG, C. Desiccation and cracking behaviour of clay loam subjected to different irrigation methods during wetting–drying cycles. *European Journal of Soil Science*, v.72, p.793-809, 2021. <https://doi.org/10.1111/ejss.13013>

RALAZAFISOLOARIVONY, N., DEGRÉ, A., MERCATORIS, B., LEONARD, A., TOYE, D., & CHARLIER, R. Assessing Soil Crack Dynamics and Water Evaporation during Dryings of Agricultural Soil from Reduced Tillage and Conventional Tillage Fields. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, v.30, p.59-69, 2020. <https://doi.org/10.3390/proceedings2019030059>

RAYHANI, M. H. T., YANFUL, E. K., & FAKHER, A. Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils. *Engineering Geology*, v.97, p.25-31, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.11.003>

RIBEIRO FILHO, J. C., DE QUEIROZ PALÁCIO, H. A., DE ANDRADE, E. M., BRASIL, J. B., & DE ARAUJO NETO, J. R. Produtividade de fitomassa herbácea em diferentes manejos no semiárido cearense. *Revista Agro@mbiente On-line*, v.9, p.386-396, 2015. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v9i4.3037>

RIBEIRO FILHO, J. C., DE ANDRADE, E. M., GUERREIRO, M. S., DE QUEIROZ PALÁCIO, H. A., & BRASIL, J. B. Climate Data to Predict Geometry of Cracks in Expansive Soils in a Tropical Semiarid Region. *Sustainability*, v.14, p.675-685, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14020675>

RICHARDS, B. G., PETER, P., & EMERSON, W. W. The effects of vegetation on the swelling and shrinking of soils in Australia. *Geotechnique*, v.33, p.127-139, 1983.

RUMELHART, D. E., HINTON, G. E., & WILLIAMS, R. J. Learning representations by back-propagating errors. *nature*, v.323, p.533-536, 1986. <https://doi.org/10.1038/323533a0>

SADEGHI, S. H., KHEIRFAM, H., & DARKI, B. Z. Controlling runoff generation and soil loss from field experimental plots through inoculating cyanobacteria. *Journal of Hydrology*, v.585, e124814, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124814>

SARI, V., DOS REIS CASTRO, N. M., & PEDROLLO, O. C. Estimate of suspended sediment concentration from monitored data of turbidity and water level using artificial neural networks. *Water Resources Management*, v.31, p.4909-4923, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1785-4>

SANTOS, J. C. N., DE ANDRADE, E. M., GUERREIRO, M. J. S., MEDEIROS, P. H. A., DE QUEIROZ PALÁCIO, H. A., & DE ARAÚJO NETO, J. R. Effect of dry spells and soil cracking on runoff generation in a semiarid micro watershed under land use change. *Journal of Hydrology*, v.541, p.1057-1066, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.016>

SHARANYA, A. G., MUDAVATH, H., & THYAGARAJ, T. Review of methods for predicting soil volume change induced by shrinkage. *Innovative Infrastructure Solutions*, v.6, p.1-16, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00485-1>

SHIT, P. K., BHUNIA, G. S., & MAITI, R. Soil crack morphology analysis using image processing techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, v.1, p.1-7, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0036-z>

STEWART, R. D., & NAJM, M. R. A. Field measurements of soil cracks. *Soil Science Society of America Journal*, v.84, p.1462-1476, 2020. <https://doi.org/10.1002/saj2.20155>

SOUSA, M. M. M. D., ANDRADE, E. M. D., PALÁCIO, H. A. D. Q., MEDEIROS, P. H. A., & RIBEIRO FILHO, J. C. Spatial-temporal soil-water content dynamics in toposequences with different plant cover in a tropical semi-arid region. *Revista Ciência Agronômica*, v.53, p.1-9, 2021. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220010>

TANG, C. S., SHI, B., LIU, C., SUO, W. B., & GAO, L. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. *Applied Clay Science*, v.52, p.69-77, 2011a. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.01.032>

TANG, C. S., CUI, Y. J., SHI, B., TANG, A. M., & LIU, C. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting–drying cycles. *Geoderma*, v.166, p.111-118, 2011b. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.018>

TANG, C. S., WANG, D. Y., ZHU, C., ZHOU, Q. Y., XU, S. K., & SHI, B. Characterizing drying-induced clayey soil desiccation cracking process using electrical resistivity method. *Applied Clay Science*, v.152, p.101-112, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.001>

TANG, C. S., ZHU, C., CHENG, Q., ZENG, H., XU, J. J., TIAN, B. G., & SHI, B. Desiccation cracking of soils: A review of investigation approaches, underlying mechanisms, and influencing factors. *Earth-Science Reviews*, v.216, e103586, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103586>

TEIXEIRA, L. C., MARIANI, P. P., PEDROLLO, O. C., DOS REIS CASTRO, N. M., & SARI, V. Artificial neural network and fuzzy inference system models for forecasting suspended sediment and turbidity in basins at different scales. *Water Resources Management*, v.34, p.3709-3723, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02647-9>

UN. 2010–2020: UN Decade for Deserts and the Fight Against Desertification 2019. [WWW Document]. Available online: https://www.un.org/en/events/desertification_decade/whynow.shtml (acesso em 16 de setembro de 2021)

USS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106; FAO: Rome, Italy, 2015. Available online: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC91947> (acesso em 12 de novembro 2021)

VELDE, B. Structure of surface cracks in soil and muds. *Geoderma*, v.93, p.101-124, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00047-6)

VOGEL, H. J., HOFFMANN, H., LEOPOLD, A., & ROTH, K. Studies of crack dynamics in clay soil: II. A physically based model for crack formation. *Geoderma*, v.125, p.213-223, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.07.008>

WANG, C., ZHANG, Z. Y., QI, W., & FAN, S. M. Morphological approach to quantifying soil cracks: Application to dynamic crack patterns during wetting-drying cycles. *Soil Science Society of America Journal*, v.82, p.757-771, 2018. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.03.0088>

WEI, X., HATTAB, M., BOMPARD, P., & FLEUREAU, J. M. Highlighting some mechanisms of crack formation and propagation in clays on drying path. *Géotechnique*, v.66, p.287-300, 2016. <https://doi.org/10.1680/jgeot.14.P.227>

WOPEREIS, M. C. S., BOUMA, J., KROPFF, M. J., & SANIDAD, W. Reducing bypass flow through a dry, cracked and previously puddled rice soil. *Soil and Tillage Research*, v.29, p.1-11, 1994. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)90097-3](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90097-3)

XIONG, D., LU, X., XIAN, J., ZHOU, H., & YANG, Z. Selection of judging indicators for surface morphology of soil crack under different development degrees in Yuanmou Arid-hot Valley Region. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, v.13, p.363-368, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11859-008-0317-8>

XIONG, D., YAN, D., LONG, Y., LU, X., HAN, J., HAN, X., & SHI, L. Simulation of morphological development of soil cracks in Yuanmou Dry-hot Valley region, Southwest China. *Chinese Geographical Science*, v.20, p.112-122, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11769-010-0112-2>

XU, J. J., ZHANG, H., TANG, C. S., CHENG, Q., LIU, B., & SHI, B. Automatic soil desiccation crack recognition using deep learning. *Geotechnique*, v.72, p.337-349, 2022. <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.P.091>

YU, B., LIU, G., LIU, Q., WANG, X., FENG, J., & HUANG, C. Soil moisture variations at different topographic domains and land use types in the semi-arid Loess Plateau, China. *Catena*, v.165, p.125-132, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.020>