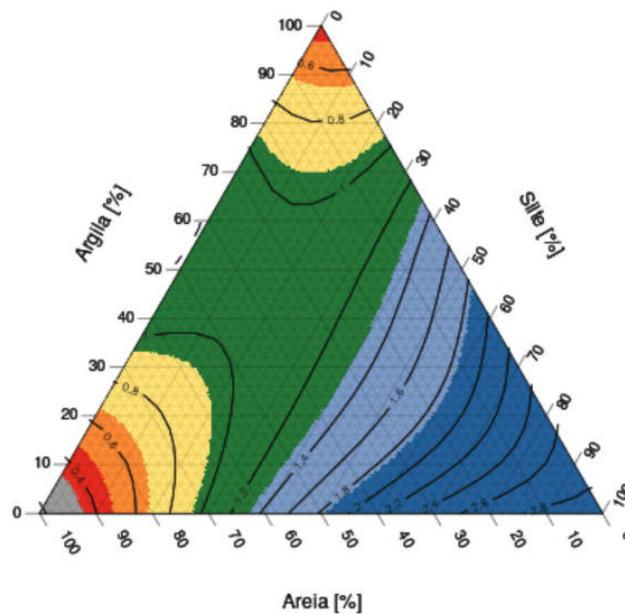




Predição da Água Disponível no Solo em Função da Granulometria para Uso nas Análises de Risco no Zoneamento Agrícola de Risco Climático



ISSN 1678-0892

Março, 2021

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Solos
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento

272

Predição da Água Disponível no Solo em Função da Granulometria para Uso nas Análises de Risco no Zoneamento Agrícola de Risco Climático

*Wenceslau Geraldes Teixeira
Daniel de Castro Victoria
Alexandre Hugo Cezar Barros
José Francisco Lumbreras
José Coelho de Araújo Filho
Fernando Antônio Macena da Silva
Evaldo de Paiva Lima
Júlio Sílvio de Sousa Bueno Filho
José Eduardo Boffino de Almeida Monteiro*

Embrapa Solos
Rio de Janeiro, RJ
2021

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1024.

Jardim Botânico, Rio de Janeiro, RJ - CEP: 22460-000

Fone: + 55 (21) 2179-4500

www.embrapa.br

www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Unidade responsável pelo conteúdo e edição

Embrapa Solos

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Daniel Vidal Perez*

Secretário-Executivo: *Marcos Antônio Nakayama*

Membros: *Bernadete da Conceição Carvalho Gomes Pedreira, Evaldo de Paiva Lima, José Francisco Lumbreras, Joyce Maria Guimarães Monteiro, Lucia Raquel Queiroz Pereira da Luz, Maurício Rizzato Coelho, Ricardo de Oliveira Dart, Wenceslau Geraledes Teixeira*

Supervisão editorial: *Marcos Antônio Nakayama*

Revisão de texto: *Marcos Antônio Nakayama*

Normalização bibliográfica: *Enyomara Lourenço Silva (CRB – 4/1569)*

Projeto gráfico da coleção: *Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Editoração eletrônica: *Alexandre Abrantes Cotta de Mello*

Capa: *Alexandre Abrantes Cotta de Mello*

Imagem da capa: *Wenceslau Geraledes Teixeira*

1ª edição

E-book (2021)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Solos

Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no Zoneamento Agrícola de Risco Climático / Wenceslau Geraldes Teixeira ... [et al.]. – Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2021.

E-book : il. color. – (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Solos, ISSN 1678-0892 ; 272).

E-book, no formato ePub.

1. Zoneamento climático. 2. Relação solo-água. I. Teixeira, Wenceslau Geraldes. II. Victoria, Daniel de Castro. III. Barros, Alexandre Hugo Cezar. IV. Lumbreras, José Francisco. V. Araújo Filho, José Coelho de. VI. Silva, Fernando Antônio Macena da. VII. Lima, Evaldo de Paiva. VIII. Bueno Filho, Júlio Sílvio de Sousa. IX. Monteiro, José Eduardo Boffino de Almeida. X. Embrapa Solos. XI. Série.

CDD 630.2515

Enyomara Lourenço Silva (CRB – 4/1569)

© Embrapa, 2021

Autores

Wenceslau Geraldes Teixeira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Geoecologia, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Daniel de Castro Victoria

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP

Alexandre Hugo Cezar Barros

Engenheiro-agrônomo, doutor em Física do Ambiente Agrícola, pesquisador da Embrapa Solos, Recife, PE

José Francisco Lumbreras

Engenheiro-agrônomo, doutor em Planejamento e Gestão Ambiental, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

José Coelho de Araújo Filho

Engenheiro-agrônomo, doutor em Geoquímica e Geotectônica, pesquisador da Embrapa Solos, Recife, PE

Fernando Antônio Macena da Silva

Agrônomo, doutor em Engenharia Agrícola, pesquisador da Embrapa Cerrados, Brasília, DF

Evaldo de Paiva Lima

Meteorologista, doutor em Meteorologia Agrícola, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Júlio Sílvio de Sousa Bueno Filho

Agrônomo, doutor em Agronomia, professor titular da Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG

José Eduardo Boffino de Almeida Monteiro

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agrometeorologia, pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP

Resumo

A estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo é fundamental para os estudos de riscos de produção agrícola em modelos de simulação e planejamento do manejo da irrigação. No entanto, a avaliação direta do volume de água disponível (AD) é bastante onerosa, pois envolve a coleta de amostras indeformadas e avaliações feitas por laboratórios especializados. Essa dificuldade tem levado os pesquisadores a buscarem formas indiretas de estimar a AD do solo. Uma das alternativas mais promissoras é o uso das funções de pedotransferências (PTF, do inglês *PedoTransfer Function*). Este estudo teve como objetivo ajustar e avaliar uma PTF para estimativa da AD baseada nos teores das partículas minerais do solo: areia total, silte e argila.

Concomitantemente, fez-se um estudo para ampliação dos três “tipos de solos” e suas respectivas AD utilizados atualmente nas simulações do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC). Foi utilizado um banco de dados de granulometria e AD oriundos de 1.201 amostras. Realizou-se o ajuste de uma equação preditiva para AD baseado em modelo linear de mistura. Os resultados da acurácia do modelo mostraram um valor da raiz do quadrado médio dos erros (RQME) de $0,036 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, um coeficiente de determinação (R^2) de 0,99 e um coeficiente de correlação (R) de 0,78. A análise dos resíduos não evidenciou tendências ou violações das pressuposições dos modelos lineares. A verificação do modelo deu-se de duas formas: validação cruzada pelo método *k-fold* com 20 subconjuntos e verificação a partir de um conjunto de dados independentes. Os estudos de validação e comparação com outras PTFs mostraram a superioridade da equação proposta. Foram gerados gráficos ternários e tabelas para a consulta dos

valores de AD em função da caracterização granulométrica do solo, além da equação para predição da AD. Com os resultados das análises realizadas para avaliação da sensibilidade do risco climático à variação da AD, foram propostas seis classes de AD, a serem utilizadas em substituição às três classes atualmente empregadas. A AD-PTF proposta faz parte de um sistema hierárquico para estimativas dos valores de AD para os solos do Brasil. A disponibilidade de dados de AD mais precisos e classes de AD mais bem definidas tem um grande potencial de aumentar a acurácia das análises de risco ao deficit hídrico no Brasil, assim como poderá beneficiar vários outros usuários que utilizam dados de AD.

Termos para indexação: risco climático, funções de pedotransferência, modelagem, zoneamento

Abstract

Prediction of Available Water Capacity Based on Granulometry for Use in Risk Analysis in Agricultural Climate Risk Zoning

The predictions of water storage capacity and in the soil is essential for studies of agricultural production risks, in crop production simulation models and irrigation management. However, direct measurements of available soil water (AW) is costly, as it involves the sampling of undisturbed samples and the analyses are carried out in specialized laboratories. These difficulties encourage researchers to look for indirect ways to estimate AW. One of the most promising alternatives is the use of the pedotransfer functions (PTF). This study aimed to fit and evaluate a PTF to estimate AW based only on the soil particle size distribution: total sand, silt and clay. A database with granulometric data and observed AW from 1,201 samples was used. A predictive equation for AW was adjusted using a linear mixture equation. The equation's accuracy showed a root mean square error value of $0.036 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ and a determination coefficient (R^2) of 0.99 and correlation coefficient (R) of 0.78. The analysis of residues did not show trends or violations of the assumptions of linear equations. The validation of the model was verified in two ways: cross-validation by the k-fold method with 20 subsets and using an independent data set. The validation and comparison studies with other PTFs also showed the superiority of the proposed equation. Ternary graphs and tables were generated for querying AW values as a function of soil granulometric characterization, in addition to the equation for AW prediction. The assessment of the sensitivity of climatic risk to the variation of AW was also carried out, and six AW classes are proposed, to be used

by the Agricultural Climate Risk Zoning simulations and replace the three values currently employed. The AW-PTF proposed in this study is part of a hierarchical system for obtaining AW values for soils in Brazil. The availability of more precise AW data and better defined AW classes has a great potential to increase the accuracy of risk analyses for water deficit, as well as benefiting several other potential users of AW data.

Index terms: climate risks, Pedotransfer functions, modelling, zoning

Sumário

Introdução

Material e Métodos

Resultados e Discussão

Conclusões

Agradecimentos

Referências

Apêndices – Análises estatísticas

Introdução

O Brasil é um país com grande diversidade de ambientes, que apresentam distintas classes de solo e clima. Isso faz com que cada uma das diferentes regiões esteja sujeita a eventos climáticos que podem afetar a produção de cultivos agrícolas. Dentre os eventos climáticos que afetam os cultivos no Brasil, podemos citar: o déficit hídrico (seca), responsável por 42,7% do valor indenizado das apólices de seguro entre os anos de 2006 a 2015 (Brasil, 2017) e o maior causador de sinistros na cultura da soja e milho entre as safras de 2013/14 a 2018/19 (Gonçalves et al., 2019); o granizo, responsável por 30% do valor indenizado entre os anos de 2006 a 2015 (Brasil, 2017); a geada, responsável por 13,2% do valor indenizado entre os anos de 2006 a 2015 (Brasil, 2017), e as chuvas excessivas na colheita, sendo uma causa de especial importância nos sinistros para a cultura do trigo (Gonçalves et al., 2019).

O Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) disponibiliza informações sobre as melhores épocas de plantio, de modo a evitar que eventos climáticos desfavoráveis coincidam com as fases mais sensíveis dos cultivos. Essas informações estão disponíveis aos gestores públicos (Banco Central, Conselho Monetário Nacional – CMN – e Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – Mapa) para auxiliar na tomada de decisão das políticas que regem o Programa de Seguro Rural (PSR), o Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (Proagro), Proagro+, destinado à agricultura familiar, além da subvenção federal ao Prêmio do Seguro Rural (PSR). O ZARC tornou-se imprescindível para identificar, quantificar e mapear as regiões mais favoráveis ao plantio dos cultivos de sequeiro e de alguns cultivos irrigados. Na atualidade, os estudos do

ZARC contemplam mais de 40 cultivos agrícolas, com a indicação das épocas de plantio e percentual de risco associado para todas as unidades da federação.

Na análise e modelagem do risco climático feito pelo ZARC, são observados o clima, a disponibilidade de água do solo bem como as informações fenológicas dos cultivos. Com relação ao clima, são consideradas informações da precipitação pluviométrica, da temperatura do ar, do deficit hídrico, dos períodos de estiagem e dos períodos de maiores ocorrências de geadas e granizos. Quanto ao solo, a capacidade de água disponível (CAD) para os cultivos é estimada em função da profundidade efetiva das raízes e da água disponível no solo. Quanto à cultura, consideram-se as cultivares e sua classificação em grupos de características fenológicas homogêneas, associadas à duração dos diferentes ciclos da cultura, precoces, médios e tardios (Cunha; Assad, 2001; Santos; Martins, 2016; Steinmetz; Silva, 2017).

Representar adequadamente essas informações no ZARC sempre foi um desafio, tanto do ponto de vista da geração das informações quanto do seu uso. O ZARC, atualmente, segue uma estratégia de simplificação de cenários por meio do balanço hídrico da cultura, considerando três grupos de cultivares e três tipos de solos quanto à sua CAD. Essa simplificação busca evitar uma complexidade excessiva capaz de inviabilizar a operacionalização das previsões em todo território nacional (Brasil, 2008). Atualmente, a regra que classifica os solos quanto aos valores de água disponível para fins de análise de riscos climáticos em função de diferentes épocas de plantio é baseada principalmente nos teores de argila, sendo regulamentada pela Instrução Normativa (IN) nº 2 de 09/10/2008 (Brasil, 2008). Nessa IN, os solos são classificados

em apenas três classes (tipos) quanto à retenção de água disponível (AD):

- a. Tipo 1 (textura arenosa): solos com teor de argila $\geq 10\%$ e $< 15\%$ ou com teor de argila $\geq 15\%$, com diferença entre o percentual de areia e o percentual de argila $\geq 50\%$; nos solos Tipo 1, a AD assume o valor de $0,7 \text{ mm cm}^{-1}$.
- b. Tipo 2 (textura média): solos com teor de argila $\geq 15\%$ e $< 35\%$, com diferença entre o percentual de areia e o percentual de argila $< 50\%$; nos solos Tipo 2, a AD assume o valor de $1,1 \text{ mm cm}^{-1}$.
- c. Tipo 3 (textura argilosa): solos com teor de argila $\geq 35\%$, cuja AD assume o valor de $1,5 \text{ mm cm}^{-1}$ (Brasil, 2008).

No entanto, na última década, ficou notório que apenas três valores de AD não são suficientes para representar a variabilidade dos solos que ocorrem no Brasil, com enviesamentos das predições, tanto de subestimação quanto de superestimação das faixas de riscos. Essa simplificação excessiva tem sido um dos principais questionamentos de como as informações sobre os solos têm sido utilizadas no ZARC, e isso tornou-se fonte de motivação para aperfeiçoar a modelagem nesse quesito. Recentes avanços metodológicos e operacionais no processamento do ZARC vêm ocorrendo, buscando acompanhar os avanços tecnológicos e o melhor entendimento dos processos de crescimento, produtividade e riscos dos cultivos agrícolas.

Várias alternativas têm sido consideradas na melhoria do ZARC, muitas das quais sem viabilidade, seja pelo elevado tempo de processamento, ou pela operacionalização de mais de 300 mil

contratos anuais no âmbito dos programas de seguro agrícola, baseados nas recomendações do ZARC.

Dessa forma, optou-se por uma estratégia com possibilidade de melhoria contínua, em que, à medida que novos dados, informações e avanços metodológicos para a estimativa da AD nos solos sejam obtidos, estes possam ser implementados, sem prejuízos à operacionalização dos diversos programas que demandam as informações do ZARC. Essa estratégia para obtenção de dados de AD será operacionalizada por um sistema hierárquico de informações de solos.

Estratégia para obtenção dos valores de AD dos solos do Brasil

A estratégia para obtenção dos dados de AD apresenta duas fases. A primeira (Fase 1) está prevista para ocorrer em um curto-médio período de tempo, com duração prevista para no máximo três anos. A segunda fase (Fase 2), que irá ocorrer em médio prazo, terá duração prevista de 4 a 15 anos. Obviamente, a duração desses prazos está condicionada a um fluxo de recursos para as atividades de levantamento e análise de um número significativo de perfis modais, com avaliações das características de retenção de água em seus diferentes horizontes, e a uma equipe de especialistas em análise e ajuste de equações preditoras. As ações de pesquisas previstas, que podem ocorrer simultaneamente à obtenção de dados de AD, e a consequente ampliação de seu conhecimento para os solos do Brasil, estão ilustradas na Figura 1.

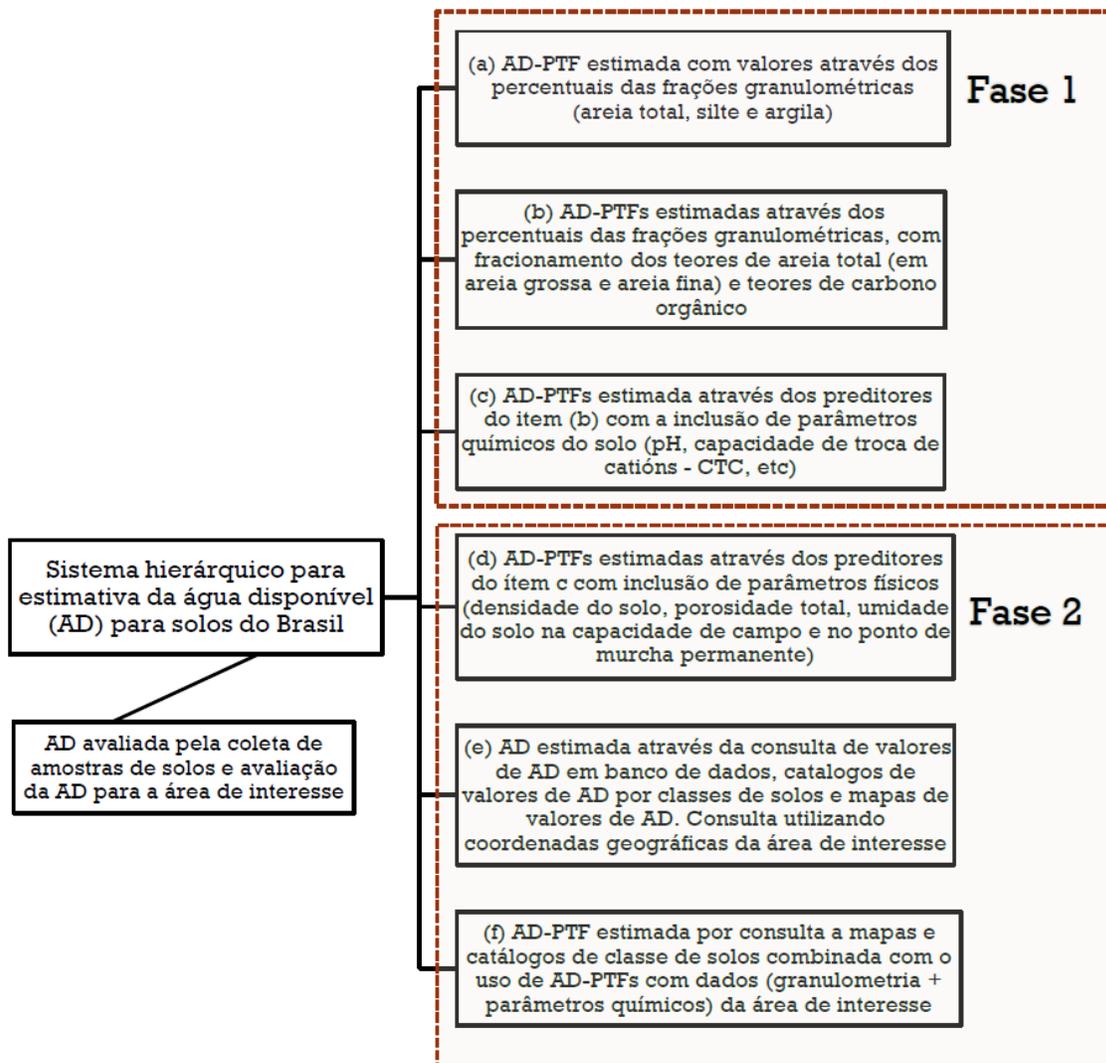


Figura 1. Diagrama de um sistema hierárquico para estimativa do valor da água disponível (AD) no solo de um determinado local do território brasileiro.

A Fase 1 tem como principal diferencial da Fase 2 o fato de não abordar informações sobre a posição geográfica do terreno (solo) e usar informações de rotina da caracterização de solos (análises granulométricas e de fertilidade). Inicialmente, a Fase 1 compreende o desenvolvimento e validação de uma função de pedotransferência para estimativa da água disponível (AD-PTF), utilizando apenas dados percentuais dos teores totais de areia, silte e argila do solo como variáveis preditivas, que é o objetivo principal desta

publicação. Ainda na Fase 1, serão desenvolvidas AD-PTFs com outras variáveis preditivas, tais como o fracionamento do teor de areia total em teores de areia grossa e areia fina. Adicionalmente, também serão testadas, como variáveis preditoras, algumas características químicas dos solos facilmente obtidas em análises de solos de rotina, como pH, teores de carbono orgânico e a capacidade de troca de cátions (CTC). Há uma expectativa do aumento da acurácia das predições da AD com o aumento do número de variáveis preditoras na equação.

Um grande desafio para o uso de AD-PTF com maior número de parâmetros (p. ex., teores de carbono e de areia fina) está relacionado à disponibilidade desses dados. Cabe salientar que o objetivo final da AD-PTF desenvolvida é servir como parâmetro para a avaliação do risco climático e de instrumento para o seguro agrícola. Atualmente, cerca de 300 mil áreas agrícolas declaram informações sobre as características do solo para fins de financiamento, com base em regras simples relacionadas à granulometria. Um sistema para estimativa da AD que seja aplicado ao universo do seguro agrícola não pode exigir um elevado número de parâmetros, sob o risco de se tornar inviável.

Dessa forma, o desenvolvimento de um sistema hierárquico para a predição de AD tem como objetivo fornecer a estimativa mais precisa em função da disponibilidade de variáveis preditoras para o local de interesse. Idealmente, áreas específicas poderão ter seus solos avaliados quanto à capacidade de retenção e AD, e não estimados por funções de AD-PTF. Essa situação, tipicamente ideal, é bem rara de ocorrer dada a dificuldade da coleta das amostras de solo com estrutura indeformada, necessárias para as análises de retenção de água, além do longo tempo, altos custos e baixa

disponibilidade de laboratórios capacitados para as análises de retenção de água em amostras de solo.

Entretanto, com essas variáveis preditoras para a AD-PTF, planeja-se também avaliar o aumento da acurácia da predição com a inclusão de informações de parâmetros relacionados à estrutura do solo. Dentre eles, destacam-se os valores de densidade do solo e da água retida na capacidade de campo e/ou no ponto de murcha permanente (Figura 1, Fase 2, item d). As avaliações do aumento da precisão e da acurácia da inclusão dessas variáveis permitirá uma avaliação mais concisa sobre a necessidade destes parâmetros nas predições.

Na Fase 2, será desenvolvido um sistema computacional que consultará, por meio das coordenadas geográficas da área de interesse e em bancos de dados especializados, a disponibilidade de dados de AD e de dados e informações sobre os solos predominantes nas áreas – p. ex., Repositório Brasileiro Livre para Dados Abertos do Solo (Samuel-Rosa et al., 2020); Hydrophysical Database for Brazilian Soils (Hybras) (Ottoni et al., 2018), Sistema de Informação de Solos Brasileiros (BDSOLOS) (Embrapa, 2014). Não havendo disponibilidade de dados de AD avaliados para os solos predominantes para a localidade de interesse, o sistema de consulta hierárquico prevê para as estimativas a utilização de mapas e catálogos de valores de AD estimados para os solos do Brasil (Figura 1, Fase 2, itens e e f). Essas informações sobre a AD poderão ser combinadas e refinadas com dados granulométricos e de fertilidade do solo de amostras coletadas na área de interesse, possibilitando, potencialmente, uma predição da AD mais acurada.

A implantação da Fase 2, poderá ser implementada mais rapidamente em algumas áreas do Brasil onde já há disponibilidade de mapas de classes de solos ou de AD em maiores escalas e mesmo regiões com solos predominantes que apresentam perfis modais com valores de AD avaliados e catalogados. Para viabilizar essa ação, está sendo elaborado um catálogo de valores de AD para as classes de solos do Brasil, compilando dados dispersos em diferentes fontes (bases de dados com informações de AD, dados existentes em publicações, como de levantamentos de solos, dissertações, teses, comunicações em congressos, artigos científicos, bem como de dados originais não publicados etc.). Análises de consistência e de conhecimento tácito de especialistas estão sendo realizadas para a avaliação judiciosa dos dados de AD e de classificação dos solos. O catálogo de AD para os solos do Brasil está em elaboração com a estimativa de valores modais e intervalos de confiança para as classes de solo até o quinto nível categórico segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018).

Em concordância com os valores do catálogo, que relaciona os valores de AD às classes de solos, estão sendo elaborados mapas de AD em diferentes escalas de mapeamento, procurando-se contemplar o maior detalhamento disponível para as principais regiões agrícolas do Brasil. Atualmente, está sendo elaborado um mapa de AD para todo o Brasil em escala generalizada (1:250.000), utilizando as informações disponibilizadas sobre as classes de solos (IBGE, 2018) em conjunto com valores de AD estimados por classe de solo (José Coelho, informação pessoal). Posteriormente, serão elaborados mapas na escala de 1:100.000 ou mais detalhados, a depender da disponibilidade de dados para alguns estados (p. ex., Alagoas – Araújo Filho et al., 2020; Pernambuco – Araújo Filho et

al., 2000) ou regiões específicas que têm mapas detalhados de solos (p. ex., a região norte do Rio de Janeiro, que tem 240.000 ha mapeados na escala de 1:10.000 no âmbito do Projeto de Irrigação e Drenagem na cultura da cana-de-açúcar no Norte Fluminense – PROJIR – Instituto do Açúcar e do Alcool,1983).

O Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil (PronaSolos) prevê a retomada dos levantamentos de solos em escalas de 1:100.000 ou mais detalhadas. Também prevê a obtenção de parâmetros de retenção de água para os solos brasileiros (Polidoro et al., 2016; Brasil, 2018; 2020). A obtenção, organização e disponibilização dos dados e informações dos solos irá contribuir significativamente com o aumento da precisão das informações de AD nos solos. Isso pode ter um relevante impacto social e econômico pela redução das perdas agrícolas por eventos climáticos. À medida que forem disponibilizados mapas de solos em escalas mais detalhadas, eles terão as informações analisadas, processadas e disponibilizadas para consulta da AD.

A estratégia prevista nas Fases 1 e 2 é desenvolver AD-PTFs, assim como avaliar outras PTFs desenvolvidas por outros grupos de pesquisa. Com esses estudos, pretende-se recomendar AD-PTFs mais acuradas para diferentes biomas, regiões e/ou classes de solo. Uma compilação de PTFs para propriedades hídricas desenvolvidas no Brasil é apresentada na Tabela 1.

O sistema hierárquico para estimativa dos valores de AD para solos do Brasil utilizará a melhor solução para a predição da AD em função das informações disponíveis (Figura 1). A estimativa de AD baseada em um sistema hierárquico foi também proposta por Schaap et al. (2001) e Zhang et al. (2017). Parâmetros físico-

hídricos, incluindo AD, por meio de coordenadas e consulta a mapas estão disponíveis nos Estados Unidos da América (United States Department of Agriculture, 2020); Austrália (Grundy et al., 2015; Soil and Landscape Grid of Australia, 2020) e globalmente (Battjes et al., 2020; ISRIC, 2020). O sistema de predição e disponibilização de AD para os solos do Brasil deverá ser validado e atualizado continuamente.

A Fase 1 está em andamento e compreende ações de curto-médio prazo. A Fase 2 está em fase de planejamento e seu alcance é estimado perdurar por até 15 anos.

No Brasil, os Latossolos e Argissolos (Figura 2) correspondem a aproximadamente 60% do território nacional (IBGE, 2018). Em algumas regiões do Brasil, no entanto, algumas classes menos representativas em termos percentuais de área da nação podem assumir uma grande importância regional, como os Luvisolos no Acre (Shinzato et al., 2015), os Vertissolos no Rio Grande do Sul (Almeida, 2017), os Plintossolos em extensas áreas em Goiás, Tocantins e Piauí na região denominada de Matopiba (Lumbreras et al., 2015), na baixada maranhense (Anjos et al., 2007), da Amazônia (Schaefer et al., 2017; Teixeira et al., 2010), e os Gleissolos e Neossolos Flúvicos nas várzeas de todo o País, em especial na região Amazônica (Teixeira et al., 2018). Muitos desses solos apresentam peculiaridades específicas para a estimativa acurada da AD, como, por exemplo, a presença de argilas expansivas e consequentes fenômenos de expansão e contração do espaço poroso, ou presença de grande volume do solo ocupado com fragmentos de rochas, concreções ou nódulos ferruginosos, reduzindo sua capacidade de armazenamento de água. Dadas

essas especificidades, tais solos futuramente serão abordados em AD-PTFs específicas.

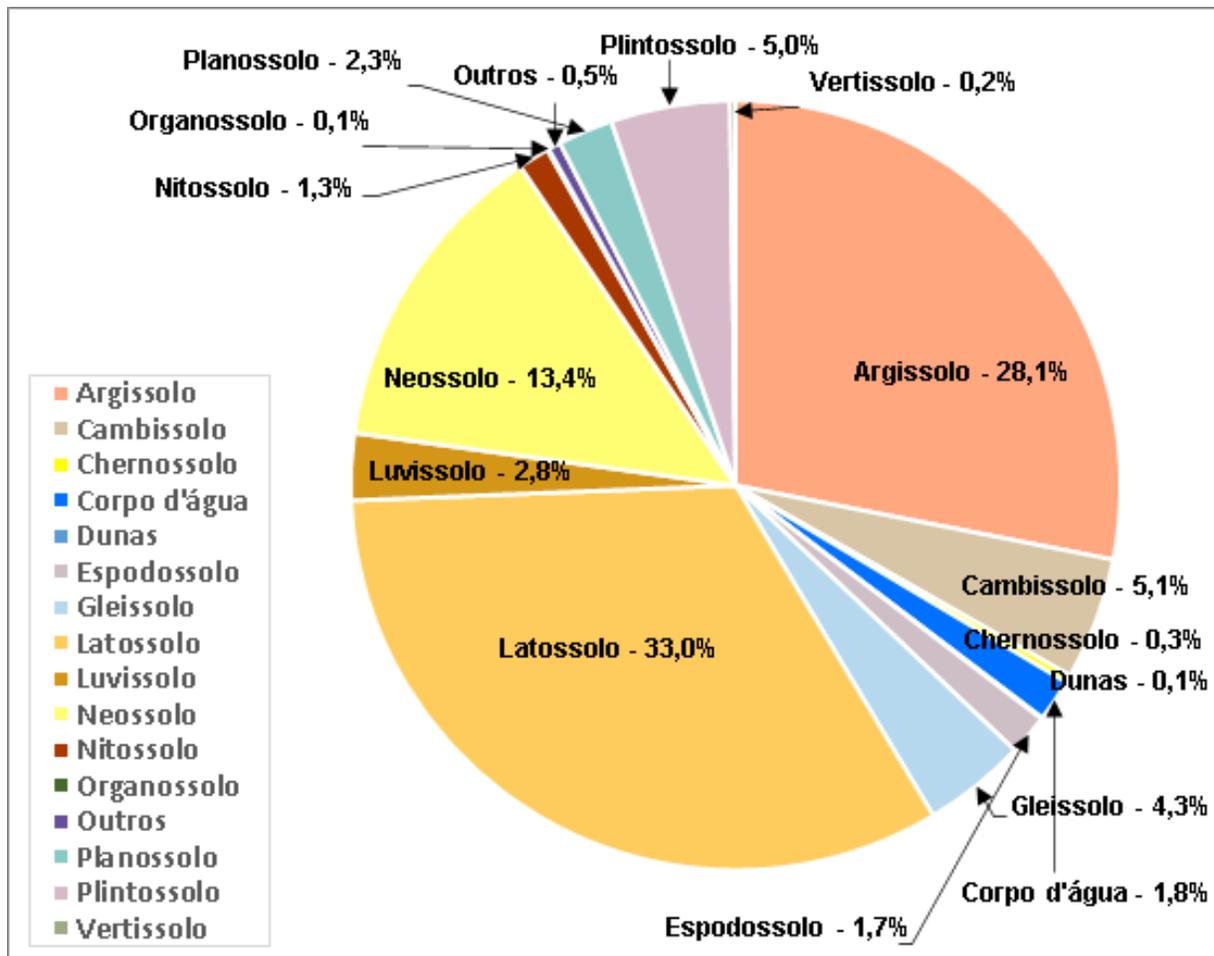


Figura 2. Gráfico de pizza com as estimativas percentuais das áreas das principais classes de solos do Brasil em nível categórico de ordem taxonômica.

Fonte: Adaptado de IBGE (2018).

Água disponível (AD) no solo

O conceito de água disponível no solo para as plantas (AD) é definido como o teor de água no solo entre um limite superior, denominado capacidade de campo (CC), e um limite inferior, denominado ponto de murcha permanente (PMP).

A capacidade dos solos de reter água em sua matriz porosa é função das suas características estruturais, físicas e mineralógicas (Reichardt; Timm, 2004) e constitui uma característica determinante para o crescimento e a produtividade das culturas agrícolas.

As culturas agrícolas podem desenvolver sistemas radiculares mais ou menos profundos, dependendo da espécie e das condições físico-químicas do solo, e, portanto, ter acesso a um maior ou menor volume de solo e solutos. Dessa forma, a capacidade de água disponível (CAD) é calculada pela AD do solo e a profundidade efetiva do sistema radicular (Z_e) (Equação 1), ou seja, a CAD representa o volume de água que pode ser retido pelo solo e absorvida pelas raízes. Esse conceito foi proposto por Veihmeyer e Hendrickson (1949) e, apesar de não considerar o equilíbrio dinâmico da água no sistema solo-planta-atmosfera, tem grande aplicabilidade prática (Carlesso, 1995; Lier, 2000). A água disponível nos estudos de física do solo geralmente tem a unidade de $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, cujos valores multiplicados por 10 são transformados em mm cm^{-1} , sendo esta a forma preferencial dos irrigantes e dos modeladores.

$$CAD = AD \times Z_e$$

Equação 1

Em que:

CAD representa a capacidade de água disponível, em mm ;

AD é a água disponível, em mm cm^{-1} ;

Z_e é a profundidade efetiva do sistema radicular, em cm .

A CAD de um solo é um dos parâmetros determinantes na duração e intensidade do deficit hídrico para o desenvolvimento e a produtividade de uma cultura, sendo utilizada em cálculos do balanço hídrico do solo, no manejo da irrigação, na avaliação do risco agroclimático, além de outras aplicações. O deficit hídrico representa o principal componente do risco agroclimático na maioria das regiões do Brasil e, portanto, judiciosas e acuradas estimativas das CADs são fundamentais para a precisão dos resultados do ZARC.

Balanço hídrico realizado nas modelagens do ZARC

O ZARC estima a disponibilidade da água no solo por uma abordagem do tipo *tipping bucket*, muito utilizada em simulações de rendimento agrícola. Essa abordagem é baseada no balanço de massa de água entre diferentes compartimentos de reservatórios de água no solo. O balanço hídrico é realizado ao longo da profundidade selecionada. O máximo de água que cada camada (compartimento) pode armazenar é definido pela sua capacidade máxima de armazenamento (Figura 3). No caso de excedente, ele é somado ao teor de água na camada imediatamente abaixo. A extração de água pelas raízes é simulada em cada compartimento até um limite crítico de armazenamento de água no solo. Quando esse limite é alcançado, a extração de água cessa e é demandada de outras camadas. O total da água armazenada no solo é o somatório da água retida em cada compartimento ao longo do perfil do solo, e a água disponível para as plantas é calculada pela diferença entre o teor de água atual e o PMP. Esse tipo de abordagem é amplamente utilizado por causa de sua relativa simplicidade.

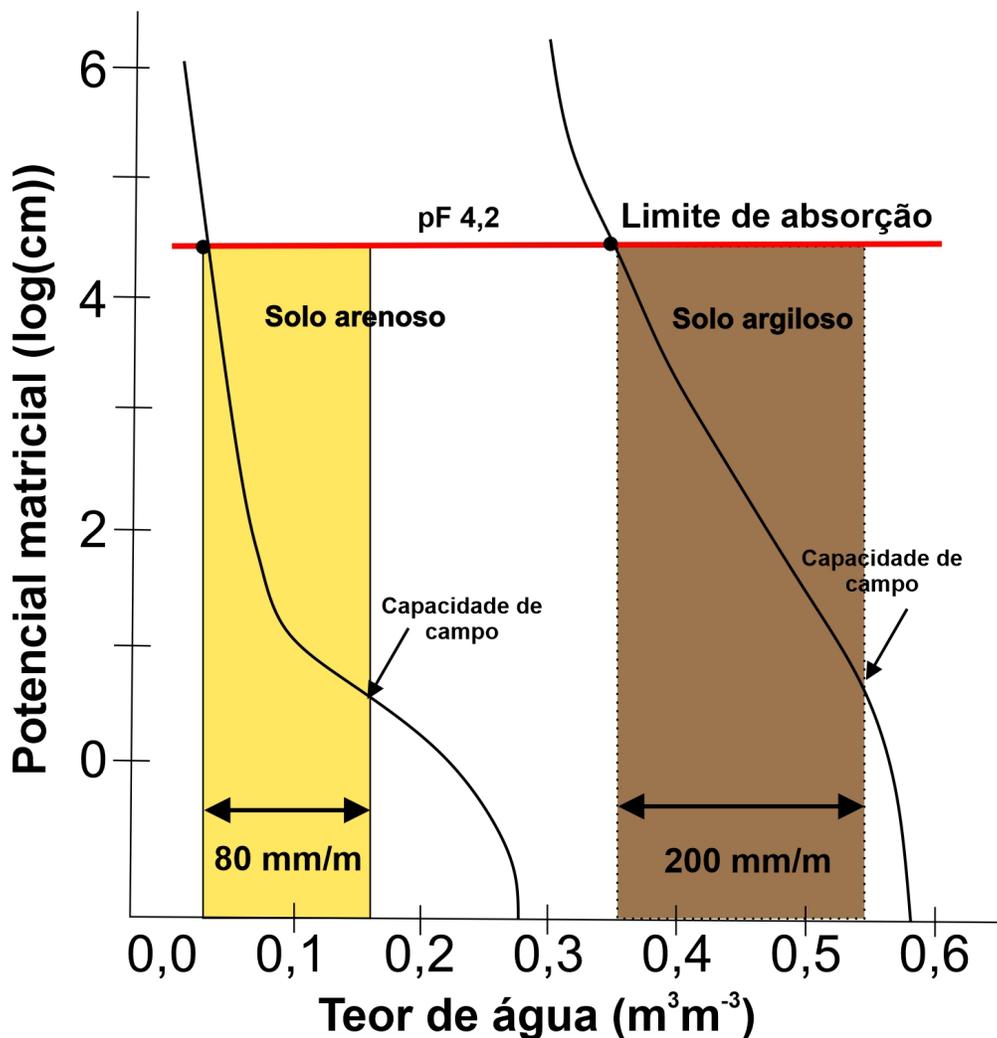


Figura 3. Ilustração do tamanho dos reservatórios de água (armazenamento). A cor amarela representa um solo com menor capacidade de armazenar água (arenoso), e a marrom, um solo com alta capacidade de armazenar água (argiloso). pF 4.2 é considerado o potencial matricial limite para água disponível.

Fonte: Adaptado de Cirad (2020).

Na estimativa de água no solo para o ZARC o solo é considerado um único reservatório de água, o qual é uma unidade homogênea, definido entre a superfície até a frente de molhamento. O volume de água disponível para as plantas é modulado pelo crescimento das raízes, denominado de frente de crescimento das raízes, no qual se encontra a reserva útil de água (Figura 4).

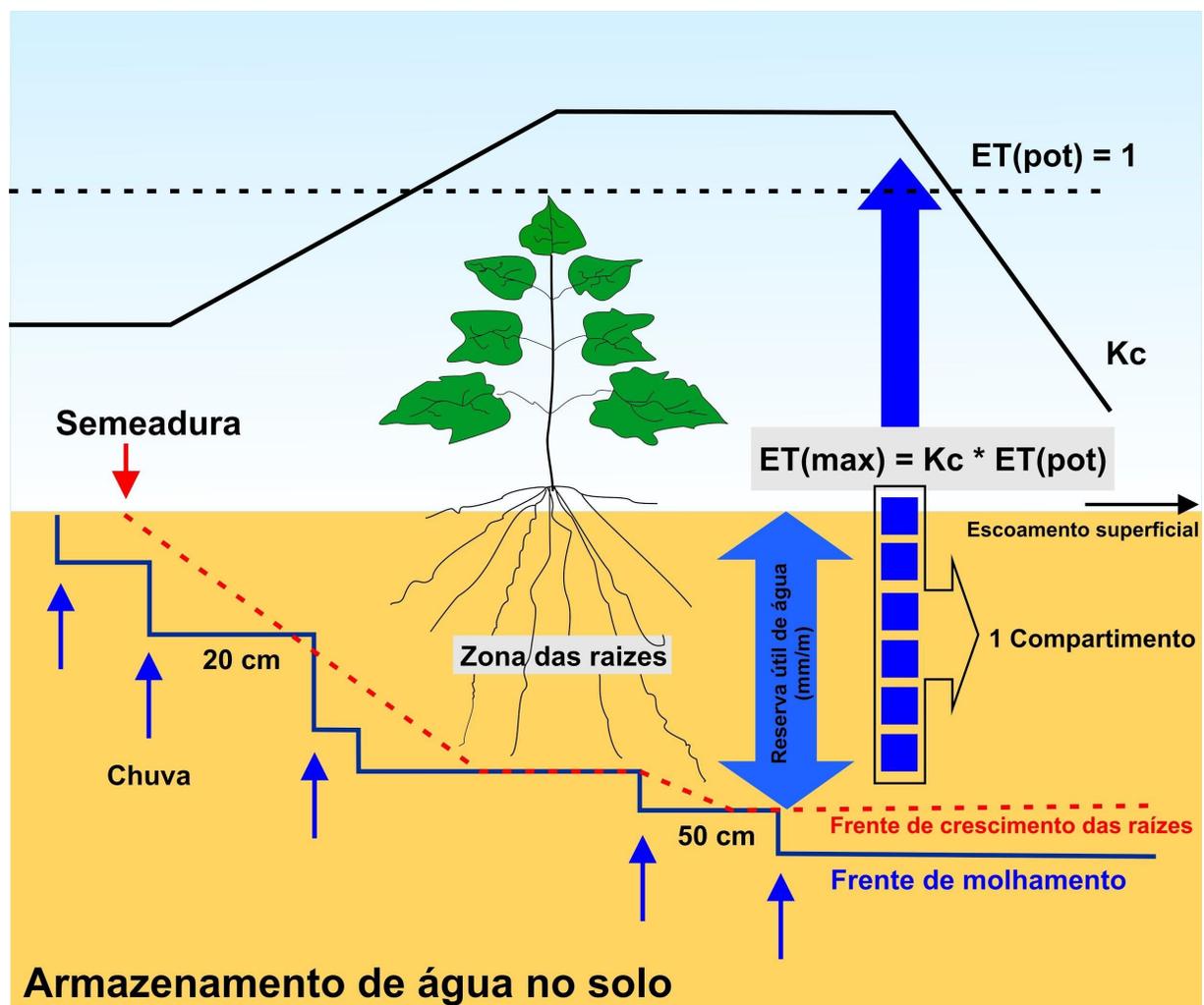


Figura 4. Balanço hídrico utilizado para as simulações do ZARC. $ET(max)$ – evapotranspiração máxima; k_c – coeficiente da cultura; $ET(pot)$ – evapotranspiração potencial.

Fonte: Adaptado de Baron et al. (1996) e Dingkuhn et al. (2003).

A profundidade e a quantidade de água armazenada disponível para a planta são determinadas pela profundidade das raízes e sua velocidade de crescimento, cuja taxa depende da fase fenológica da cultura. Ressalta-se, ainda, que o crescimento das raízes pode ser bloqueado pela frente de molhamento ou por um estresse hídrico muito forte.

As simulações realizadas pelo ZARC são baseadas no modelo SARRA (*Systeme d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques*) desenvolvido por Baron et al. (1996), considerado um modelo empírico de reservatórios (*tipping bucket*), com escala temporal de simulação diária, simulando o desenvolvimento da planta em função do consumo e disponibilidade da água no solo. Com o uso de modelos de balanço hídrico, pode-se levar em consideração não somente a variabilidade espaço-temporal das chuvas, mas também a variação espacial dos solos. Modelos de balanço hídrico com base no conceito de diferentes reservatórios de água no solo têm a vantagem de demandarem poucos parâmetros de entrada, sem, no entanto, comprometer, na maioria das simulações, a precisão dos resultados. Esses modelos são mais bem adaptados para análises regionais, pois propagam menos erros das estimativas dos parâmetros hidráulicos do solo, comparativamente aos modelos baseados na solução da equação de Richards, os chamados modelos conceituais (Leenhardt, 1991).

A identificação das fases dos períodos com menores riscos de insucesso devido à probabilidade de ocorrência de deficit hídrico depende do tipo da cultura, mas, em geral, os períodos críticos referem-se à fase inicial (Fase 1) da semeadura e emergência, responsável pelo estabelecimento da lavoura e, conseqüentemente, pelo alcance de bons rendimentos. Na fase de produção, estão associados à maturação e/ou ao enchimento de grãos (Fase 3), considerada a mais crítica para as culturas (Figura 5) (Baron et al., 1996). Destaca-se que, no ZARC, por se tratar de um modelo agroclimático, parte-se do pressuposto de que não ocorrem limitações quanto à fertilidade dos solos e danos em razão do ataque de pragas e de doenças.

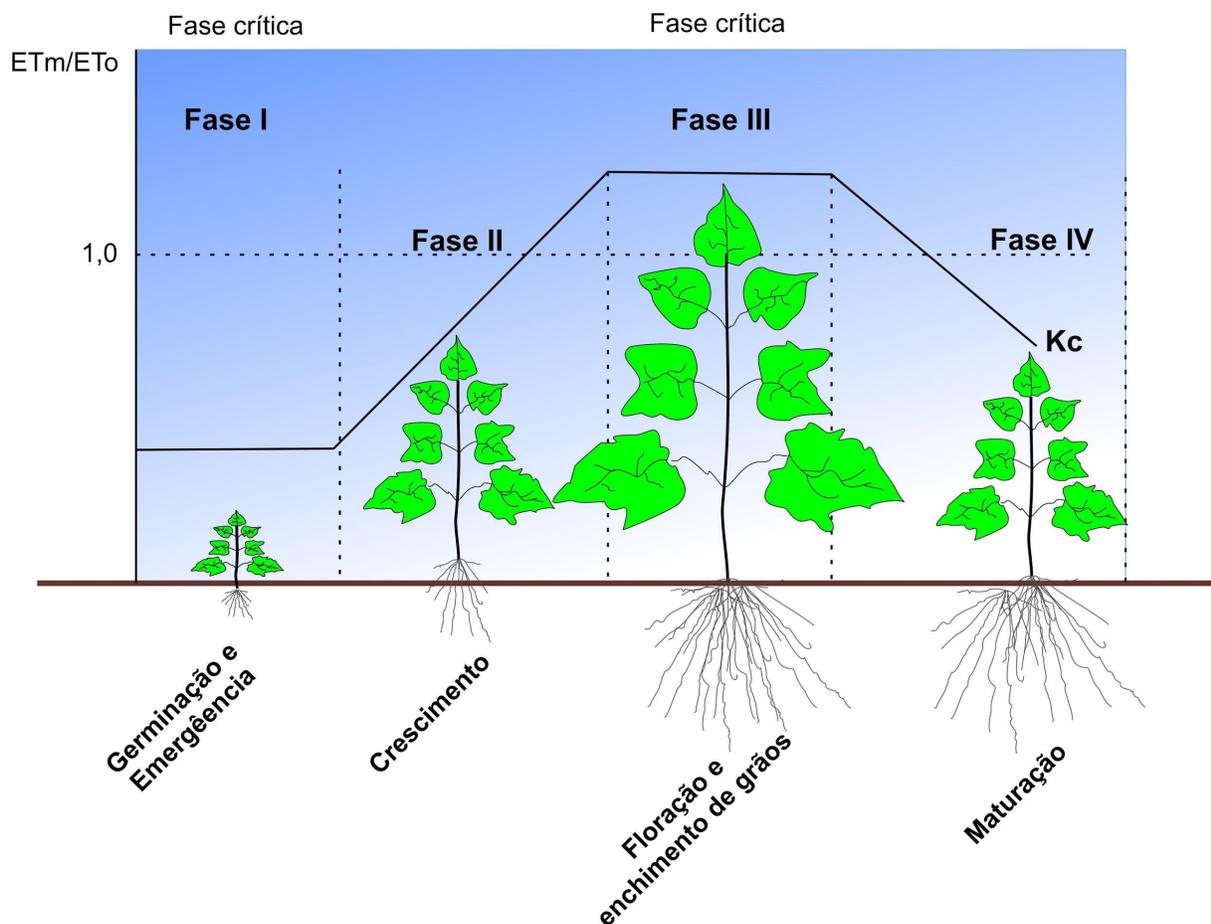


Figura 5. Esquema genérico das fases críticas dos cultivos de grãos. ETm – evapotranspiração máxima da cultura; kc – coeficiente da cultura; ETo – evapotranspiração de referência; Kc – coeficiente de evapotranspiração da cultura.

Considerando que a produção potencial da cultura é função de suas características genéticas e de sua adaptação ao ambiente, a produção final pode ser penalizada pela oferta hídrica. Como parâmetros de saída, o modelo SARRA gera o Índice de Satisfação de Necessidade de Água (ISNA) da cultura, que expressa o atendimento ou não das necessidades hídricas da cultura em cada uma de suas fases fenológicas para cada época de semeadura/plantio. Esse índice é calculado por meio da relação entre a evapotranspiração real (ETr) e a evapotranspiração máxima da cultura (ETm) (Equação 2).

$$CAD=AD \times Ze$$

Equação 2

Em que:

ISNA é o Índice de Satisfação de Necessidade de Água (adimensional em decimal);

E_{Tr} é a evapotranspiração real (mm), estimada pela generalização introduzida por Forest (1984) na função proposta por Eagleman (1971), que descreve a dinâmica da *E_{Tr}* em função da evapotranspiração de referência (*E_{To}*) e da umidade relativa do solo na zona radicular.

E_{Tm} é a evapotranspiração máxima da cultura (mm), sendo calculada pela Equação 3.

$$CAD=AD \times Ze$$

Equação 3

Em que:

E_{To} é a evapotranspiração de referência (mm);

K_c é o coeficiente cultural (adimensional).

O *ISNA* foi utilizado em estudos por Assad et al. (2001); Cunha e Assad (2001); Farias et al. (2001) e Sans et al. (2001), e é o que vem sendo utilizado desde a implantação do ZARC para a modelagem e definição dos calendários agrícolas e riscos associados.

Operacionalmente, para cada cultura agrícola, o modelo de risco climático é executado para um conjunto de mais de 3.500 estações meteorológicas distribuídas em todo Brasil, todas com pelo menos 20 anos de dados observados. Em cada simulação, são avaliadas 36 possíveis datas de semeadura/plantio (36 decêndios), pelo menos três ciclos de crescimento da cultura e três tipos de solo, resultando em 324 simulações distintas. Para cada uma dessas simulações, são obtidos os valores de ISNA de duas fases fenológicas críticas e, na sequência, é estimada a frequência de ocorrência de valores superiores ou inferiores de um limiar crítico, definido por especialistas da cultura. Essa análise de frequência considera quatro níveis de risco. Todos esses resultados são interpolados, resultando em um conjunto de 2.592 mapas, que são analisados para que seja identificada a melhor época de semeadura/plantio de cada cultura em cada município do País.

Funções de Pedotransferência (PTF, do inglês *PedoTransfer Function*) para estimar água disponível

O termo “função de pedotransferência” (PTF) foi introduzido na ciência do solo na segunda metade da década de 1980 para padronizar expressões anteriores (Bouma, 1989; Pachepsky; Rawls, 2004; Vereecken et al., 2010) e com o intuito de sintetizar o seu propósito de “transformar dados que possuímos em dados de que necessitamos”. As PTFs consistem-se de expressões matemáticas para se estimar atributos dos solos a partir de características medidas rotineiramente, denominadas também de métodos indiretos (McBratney et al., 2002), aliando facilidade, menor custo e confiabilidade para obtenção de dados.

Há um número limitado de estudos relacionados às PTFs de funções hidráulicas dos solos no Brasil (Tomasella; Hodnett, 1998; Assad et al., 2001; Giarola et al., 2002; Tomasella et al., 2003; Barros et al., 2010; Medrado; Lima, 2014; Barros et al., 2013; Andrade et al., 2020), se considerada a sua dimensão geográfica, com domínios morfoclimáticos bastante distintos. Uma das razões é a raridade dos dados e organização incipiente de banco de dados de solos no País.

De acordo com Rossato (2002), para os solos brasileiros, a acurácia das PTFs, dependendo do método de estimação e das variáveis utilizadas, varia entre 0,04 e 0,13 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Na Tabela 1, são apresentados valores de avaliações estatísticas para diversas PTFs desenvolvidas nas últimas décadas, especificamente para solos no Brasil.

Existem vários fatores que afetam a retenção da água no solo, num intrincado processo que depende de sua estrutura, composição granulométrica, mineralógica e orgânica (Rawls et al., 1991; Wösten et al., 2001; Pachepski; Rawls, 2004). As principais características edáficas que são mais utilizadas como preditoras das funções hidráulicas dos solos são a composição granulométrica (teores de areia, silte e argila) e o teor de carbono orgânico. Muitas dessas informações estão disponíveis nos levantamentos de solos e nas análises feitas para caracterização granulométrica e da fertilidade do solo. Outras variáveis têm sido exploradas para o desenvolvimento de PTFs (Pachepsky; Rawls, 2004), como os valores de densidade do solo, tipo e percentuais das argilas. Entretanto, essas informações são raras nos estudos de solos do Brasil.

As propriedades hidráulicas da maioria dos solos brasileiros apresentam uma distinção pela reduzida quantidade de silte quando comparada aos solos de regiões de clima temperado (Tomasella et al., 2003). A mineralogia e composição da assembleia mineralógica do solo também pode interferir na retenção de água no solo, como pode ser observado entre solos de mineralogia com argilas 2:1 (p. ex., montmorilonita e esmectita), e as argilas predominantes nos solos do hemisfério sul (p. ex., caulinita, goethita e hematita), conforme Minasny e Hartemink (2011).

Dois processos principais definem a retenção de água do solo: a capilaridade e a adsorção. A capilaridade depende do arranjo e da dimensão dos poros. A estrutura do solo, a densidade e a porosidade são variáveis importantes para explicar a retenção da água nos potenciais próximos à capacidade de campo. A adsorção, que ocorre na superfície das partículas do solo, tem maior influência na faixa mais seca do solo e é mais influenciada pela composição granulométrica, em especial pela assembleia mineralógica do solo. Diferenças na superfície específica de argilas (p. ex., caulinita e vermiculita) fazem com que solos com o mesmo teor de argila tenham distintos conteúdos de água retida em um mesmo potencial.

Tabela 1. Variáveis preditoras para estimativas da umidade volumétrica do solo nos potenciais de 10 kPa, 33 kPa e 1.500 kPa e da água disponível (AD) utilizadas em 19 estudos e seus coeficientes de determinação (R^2).

Variáveis preditoras	Umidade volumétrica (θ) do solo nos potenciais matriciais de 10 kPa, 33 kPa e 1.500 kPa			Água disponível (AD)	Referência
	θ_{10}	θ_{33}	θ_{1500}	$\theta_{10} - \theta_{1500}$	
Coeficiente de determinação (R^2)					
silte, argila	-	0,91	0,95	-	Arruda et al. (1987)
areia, silte, argila, densidade do solo, matéria orgânica	-	0,99	0,99	-	Silva et al. (1990)
silte e argila	0,82	-	0,78	0,21	Berg et al. (1997)
areia, silte, argila, densidade do solo	-	0,57	0,50	-	Coelho et al. (2015)
silte, argila, carbono orgânico	-	0,91	0,92	-	Gaiser et al. (2000)
total de areia	0,77	-	0,72	0,23	Assad et al. (2001)
areia	0,78	-	0,72	0,23	Assad et al. (2001)
areia, argila, silte, Fe ₂ O ₃	0,79	-	0,81	0,42	Giarola et al. (2002)
areia, silte, argila, densidade	-	0,96	0,95	-	Oliveira et al. (2002)
areia, silte, argila, matéria orgânica	0,67	0,69	0,76	-	Peraza (2003)
areia, silte, argila, matéria orgânica, densidade	0,80	0,89	0,91	-	Mello (2005)
areia, silte, argila, densidade	0,65	0,68	0,77	-	Urach (2007)
areia, silte, argila	-	0,92	0,89	-	Alves et al.

					(2009)
areia, silte, argila, matéria orgânica, densidade	0,67	0,62	0,62	-	Reichert et al. (2009)
areia, silte, argila, carbono orgânico, densidade	-	0,67	0,72	-	Nascimento et al. (2010)
densidade, macroporosidade, microporosidade	-	0,93	0,81	-	Michelon et al. (2010)
argila, silte, matéria orgânica, densidade	-	0,58	0,59	-	Rodrigues et al. (2011)
matéria orgânica, areia fina, areia grossa	-	0,64	-	-	Santos et al. (2013)
areia, silte, argila, densidade e carbono do solo	0,48 0,86 0,98	0,48 0,86 0,98	0,97 0,94 0,96	-	Nascimento* (2015)

*Os valores na vertical se referem às profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm.

Fonte: Adaptado de Barros (2014).

No caso particular de uma PTF preditiva de AD para ser utilizada na modelagem no ZARC, é importante que seja simples e operacional em toda a sua concepção, dada a complexidade de sua implantação, tanto do ponto de vista operacional de processamento para todo o Brasil e para diversas culturas quanto à praticidade do agricultor conseguir e fornecer as informações da AD do solo do talhão a ser segurado.

As informações sobre a classe textural ou da composição granulométrica não são suficientes para predizer, em muitos solos, a sua AD com acurácia, uma vez que solos que sofreram processos pedogenéticos diferenciados podem apresentar valores de AD distintos, mesmo apresentando granulometria similar.

O presente estudo apresenta uma primeira aproximação, que amplia a precisão das estimativas de AD dos solos do Brasil utilizadas para as recomendações de decênios de plantio e estimativas de risco utilizadas no ZARC. Considerou-se aqui que a análise granulométrica de amostras de solos é uma análise de rotina e de baixo custo, ofertada por diversos laboratórios no País.

O objetivo deste estudo foi gerar e validar uma PTF para estimativa da água disponível (AD), utilizando como preditores somente os teores de areia total, silte e argila. Concomitantemente, fez-se um estudo para ampliação dos três “tipos de solos” e suas respectivas AD utilizados atualmente nas simulações do ZARC.

Material e Métodos

As etapas envolvidas no trabalho incluíram: 1) obtenção de dados amostrais, verificação de consistência e organização da base de dados; 2) ajuste das equações preditivas de AD; 3) avaliação da acurácia do modelo a partir de validação cruzada, verificação com base de dados independente e comparação com outras PTFs publicadas na literatura; e 4) determinação de novos intervalos de AD para a avaliação do risco climático. A base de dados organizada e os *scripts* utilizados para as análises e confecção das figuras estão disponíveis no endereço https://github.com/dvictori/ptf_zarc.

Base de dados de água disponível (AD) para solos brasileiros

Foram organizadas duas bases de dados (BD) para o ajuste e validação de uma equação preditora da AD. A primeira BD, doravante denominada BD-ZARC, foi utilizada no processo de desenvolvimento e validação cruzada do modelo. Uma BD adicional, denominada BD-Independente, foi composta por novos dados (de granulometria e de AD) não utilizados nos ajustes da equação preditora e foi utilizada nas análises de validação.

A BD-ZARC contém dados observados de umidade volumétrica do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente de horizontes e camadas de solos. Com esses parâmetros, foi possível calcular os valores de AD ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). Os outros parâmetros, obrigatórios, para a inclusão do dado na BD-ZARC foram dados da composição granulométrica, com o fracionamento desta em teores de areia total (partículas de tamanho entre 2,00 mm e 0,05 mm), de silte (partículas menores que 0,05 mm e maiores de

que 0,002 mm), e os teores de argila (partículas menores que 0,002 mm). Os dados da composição granulométrica, em percentuais, obrigatoriamente somavam 100%. Quando os dados apresentavam a fração areia subdividida (p. ex., teores de areia fina, areia média e areia grossa), as subdivisões foram somadas e utilizou-se apenas o valor de areia total.

Adotou-se como critério exclusivo para o cálculo da AD (Equação 4) a diferença entre a umidade volumétrica medida na capacidade de campo (CC), considerada neste estudo exclusivamente o valor de umidade em equilíbrio a 10 kPa, e a umidade no ponto de murcha permanente (PMP), considerando a umidade de equilíbrio no potencial de 1.500 kPa.

$$AD = CC - PMP$$

Equação 4

Em que:

CC é o conteúdo volumétrico de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) retido na amostra de solo em equilíbrio com o potencial de 10 kPa;

PMP é o conteúdo volumétrico de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) retido na amostra de solo em equilíbrio com um potencial de 1.500 kPa.

Os valores de AD são apresentados nas equações estudadas com a dimensão de mm cm^{-1} . Essa conversão é feita pela Equação 5:

$$AD [\text{mm cm}^{-1}] = AD [\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}] \times 10$$

Equação 5

Os dados observados que compõem a BD-ZARC foram selecionados das seguintes bases de dados públicas ou de dados originais de projetos de pesquisa dos autores:

1. Hybras: Base organizada pelo CPRM contendo a maior quantidade dos dados (Ottoni et al., 2018);
2. Sistema de Informação de Solos Brasileiros – BDSOLOS: Amostras cadastradas no BDSOLOS, Embrapa, 2014 (<<https://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>>);
3. WoSIS: Amostras presentes no banco Global World Soil Information System, do World Soil Information (ISRIC), disponível em: <<https://www.isric.org/explore/wosis>>; e
4. Reunião de Correlação e Classificação de Solos de Rondônia (RCC-RO) (Teixeira et al., 2018), Reunião de Correlação e Classificação de Solos de Roraima (Teixeira et al., 2019b).

Todo o conjunto de dados passou por avaliação de consistência, sendo descartados dados com valores discrepantes. Eles foram identificados por análise visual de gráficos de dispersão dos valores de AD observados em função dos preditores (areia, silte e argila) e da análise visual dos resíduos gerados pelos modelos ajustados.

Foram também desconsiderados dados oriundos das classes dos Vertissolos, Chernossolos, Organossolos, assim como dados de horizontes espódicos, plânicos e nátricos, dada a dificuldade de captar a variabilidade da AD utilizando apenas como preditoras as frações granulométricas. Dessa maneira, a PTF desenvolvida ajusta-se melhor para solos sem elevados percentuais de argilas

expansivas (2:1) e sem a presença de horizontes adensados. A base de dados concentra-se em amostras principalmente de horizontes das classes dos Latossolos, Argissolos e Neossolos Quartzarênicos, que representam mais de 60% das classes de solos no País (Figura 2). Adicionalmente, grande parte da área agrícola do Brasil está sobre Latossolos (Figura 6), o que justifica nosso foco numa maior precisão para predição da AD nessa classe de solo. Os dados de AD oriundos da base WOSIS são provenientes principalmente de solos da Colômbia e de países europeus e foram adicionados à BD-ZARC pela raridade, no Brasil, de dados de AD de solo com predomínio da fração silte.

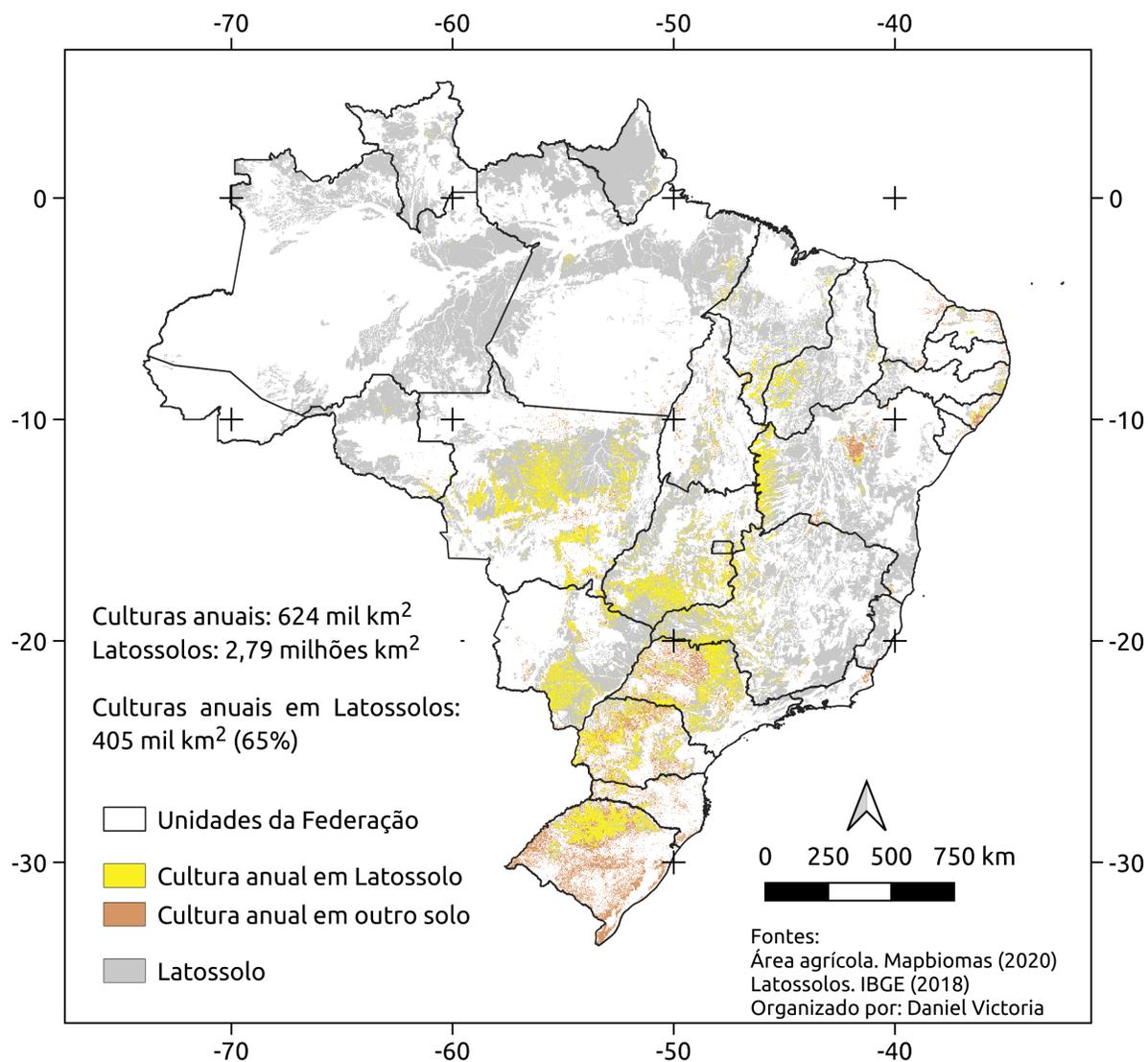


Figura 6. Mapa mostrando a distribuição: (a) do total das áreas agrícolas e (b) das áreas agrícolas em Latossolos (classe de solo dominante no polígono de mapeamento)

Fonte: Mapbiomas (2020) e IBGE (2018).

A BD-Independente foi composta por dados originais cedidos pelo Dr. Eduardo Guimarães Couto (UFMT, Cuiabá), Dr. Jean Dalmo de Oliveira Marques (IFAM, Manaus) e Joberta Cardoso Pastana Yakuwa (mestranda da UFRA). Os dados passaram pelos mesmos critérios aplicados à base BD-ZARC.

A distribuição dos dados granulométricos é apresentada em gráfico ternário com a legenda em faixas de AD. A distribuição dos dados granulométricos e de AD é apresentada na forma de gráficos de densidade de probabilidade Kernel. Os dados observados de AD utilizados foram também classificados nos subagrupamentos texturais (Santos et al., 2018), e a estatística descritiva é resumida em gráficos *Boxplots*, onde os valores ao centro do polígono (box) indicam a média dos valores do agrupamento; a mediana é indicada por uma linha horizontal. Os polígonos representam os valores compreendidos entre o primeiro e o terceiro quartis. As hastes (*whiskers*) representam os valores acima e abaixo dos quartis num intervalo de 1,5 vez a distância interquartil. Dados discrepantes (*outliers*), identificados por pontos nos gráficos *Boxplots* foram considerados quando apresentavam valores maiores que $\pm 1,5$ vezes a distância interquartil. A discussão quanto à magnitude dos valores de AD nos solos neste trabalho é feita com base nos critérios de classificação em cinco faixas de valores, considerados com valores de AD muito baixos, baixos, médios, altos e muito altos. As faixas correspondentes a essa classificação, expressas em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e mm cm^{-1} , são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Classificação dos valores de água disponível (AD) em solos do Brasil em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e mm cm^{-1}

Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
		$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$		
$AD < 0,050$	$0,050 \leq AD < 0,075$	$0,075 \leq AD < 0,100$	$0,100 \leq AD < 0,125$	$AD \geq 0,125$
		mm cm^{-1}		
$AD < 0,50$	$0,50 \leq AD < 0,75$	$0,75 \leq AD < 1,00$	$1,00 \leq AD < 1,25$	$AD \geq 1,25$

Fonte: Adaptado de Lumbreras (2008).

Ajuste da equação preditiva de AD em função de dados granulométricos

Dentre as diversas técnicas de ajuste de equações para funções PTF, foram testados inicialmente ajustes com o uso de equações multilineares, utilizando *forward and backward selection*, *Random Forest* e krigagem. Os resultados não foram satisfatórios, principalmente pela descontinuidade abrupta das predições com pequena variação da granulometria e distribuição enviesada dos resíduos. Essas tentativas preliminares não serão apresentadas. Com a premissa de se ter uma variação de AD sem mudanças abruptas nos valores preditos com uma pequena variação na composição granulométrica do solo, selecionou-se o procedimento de ajuste de modelos de mistura (Draper; Pukelsheim, 1999). O uso desse procedimento possibilita uma restrição à geometria e transições mais suaves entre as predições com valores preditivos próximos. Os resíduos dos modelos foram submetidos a análises de normalidade, uma das pressuposições de modelos lineares, assim como foram observados a independência dos dados, a homogeneidade de variâncias e a aditividade (Draper; Smith, 1998).

Os dados observados de AD foram transformados usando-se o parâmetro lambda estimado pelo algoritmo Box-Cox para melhor atendimento das pressuposições dos modelos lineares. Toda a análise dos dados foi executada em ambiente de análise R (The R Foundation, 2018), e a obtenção do parâmetro lambda usado na transformação dos dados de AD observados foi feita utilizando o pacote MASS (Venables; Ripley, 2002).

Os valores de AD calculado (ADcal) com intervalo de confiança de 95% foram obtidos para todos os resultados possíveis (5.151) das

combinações de resultados granulométricos das frações areia [AT], silte [SIL] e argila [ARG] considerando dados em valores percentuais, sem decimais, e cuja soma totaliza 100%. Todos os 5.151 valores de ADcal para essa matriz de combinação das frações granulométricas são fornecidos no repositório dos dados (https://github.com/dvictori/ptf_zarc/blob/master/resultados/Preditos_triangulo_AD_m2.csv). Optou-se por disponibilizar também os dados no formato de tabela pela facilidade de consulta dos valores de AD sem necessidade de sistemas computacionais. Adicionalmente, a disponibilização dos dados em tabelas (*look up at tables*) facilitará eventuais ajustes dos valores de AD para algumas combinações granulométricas ou mesmo ajustes específicos por região.

Os resultados das ADcal são também apresentados num gráfico ternário da granulometria com os valores de AD na legenda.

Testes estatísticos para avaliação da acurácia e validação de PTF

A seleção dos parâmetros preditivos e das combinações das interações entre eles foi feita pelo teste *t* de significância dos coeficientes. A acurácia das predições das equações foi avaliada por meio dos coeficientes de determinação (R^2), da raiz do erro quadrático médio (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*) e do coeficiente de correlação linear (*R*) entre os valores de AD observados e de AD calculados. As equações das estatísticas de avaliação da acurácia do modelo são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros estatísticos utilizados para verificar a acurácia das predições.

Raiz do erro médio quadrático – *root mean square error* (RMSE) $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}$ Equação 6

Coefficiente de determinação (R^2) $1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$ Equação 7

Coefficiente de correlação (R) $\frac{\sum_{i=1}^N [(y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [(y_i - \bar{y})^2 (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2]}}$ Equação 8

Em que:

\hat{y}_i é a estimativa do valor

\bar{y} é a média dos valores observados

y_i é o valor observado

A estatística R^2 é baseada na covariância entre os valores de AD observados e AD calculados. A maior acurácia da capacidade de predição é indicada por valores de R^2 próximos a 1,0.

A análise das pressuposições de modelos lineares foi feita por meio dos gráficos de dispersão de resíduos *versus* valores preditos de AD, que indicam a linearidade e as falhas. Os gráficos *Quantil-Quantil* (Q-Q) indicam a normalidade dos resíduos, quando estes se alinham na linha pontilhada do gráfico. O gráfico de dispersão da raiz quadrada do valor absoluto do resíduo padronizado *versus* os valores preditos permite ver a homogeneidade de variâncias. Os gráficos da distância de Cook, de dispersão do resíduo padronizado *versus leverage* com a distância de Cook e o de dispersão da distância de Cook *versus leverage* permitem identificar os dados influentes no modelo. Todas essas análises são apresentadas no Apêndice – Análises Estatísticas. Adicionalmente, a base de dados utilizada e os *scripts* para as análises estatísticas também estão disponíveis em https://github.com/dvictori/ptf_zarc.

Validação cruzada, comparação com outras PTFs e teste de desempenho utilizando-se com uma base dados independente

A PTF desenvolvida passou por um processo de validação que compreendeu três diferentes etapas: validação cruzada, comparação com outras PTFs publicadas e teste de desempenho com uma base de dados independente. Para todos os casos, foram avaliados RMSE e R.

A validação cruzada, utilizada para avaliar a acurácia do modelo (Souza et al., 2016; Haddad et al., 2018), foi realizada durante o processo de calibração e empregou a estratégia *k-fold*. Nela, o conjunto completo dos dados é dividido em *k* subconjuntos, os coeficientes do modelo são calibrados utilizando *k-1* subconjuntos e avaliados no subconjunto restante. Esse procedimento é repetido *k*

vezes de forma que todos os subconjuntos são utilizados na etapa de verificação. Ao final do processo, obtêm-se as estimativas feitas pelo modelo a partir de dados que não foram utilizados no processo de calibração. O segundo processo de verificação consistiu em utilizar uma base de dados independente, onde a PTF desenvolvida foi aplicada.

Para comparação com PTFs que predizem AD, desenvolvidas em outros estudos, foram considerados como pressupostos: i) a PTF deve utilizar como preditores apenas dados das frações granulométricas areia total, silte e argila ou pelo menos uma dessas; e ii) estimar AD pela diferença entre a água retida na tensão de 10 kPa e 1.500 kPa (CC - PMP). As PTFs identificadas como compatíveis foram as propostas por Assad et al. (2001), Giarola et al. (2002) e Berg et al. (1997). A equação de Berg et al. (1997) não utilizou apenas dados do Brasil, mas também, como no presente estudo, fez a complementação com dados de AD observados em solos europeus.

Foram feitas comparações utilizando a BD-ZARC e a BD-Independente. Em ambos os casos, foram consideradas apenas as amostras que figuravam dentro da faixa de valores granulométricos para as quais as PTFs foram desenvolvidas (domínio da função).

Determinação de intervalos de classes de água disponível (AD) para avaliação de risco climático

Realizou-se uma análise de sensibilidade do risco hídrico em relação aos valores de AD. A análise foi conduzida utilizando a parametrização fisiológica utilizada para cultura da soja com ciclo de 120 dias, simulado no período de novembro a fevereiro. Foram utilizadas localidades com série de dados com no mínimo 30 anos

de observações e feitos testes simulando o clima de municípios em regiões com condições climáticas distintas durante o período de cultivo. As condições testadas foram: a) região mais úmida, com precipitação 98% superior à evapotranspiração de referência ETo (Itaberá, SP); b) moderadamente úmida, com precipitação 48% superior à ETo (Bento Gonçalves, RS); c) moderadamente seca, com precipitação 19% superior à ETo (Herval, RS); d) seca, com precipitação 9% inferior à ETo (Ibicoara, BA). Os dados climáticos, assim como a parametrização e os algoritmos para simulação utilizados estão disponíveis no sistema: Métricas e Informações para Conservação e Uso de Recursos na Agricultura (Micura) que é utilizado nas simulações do ZARC (Nakai et al., 2018). Em cada uma das regiões, o risco hídrico é definido pela frequência com que o ISNA da fase crítica foi inferior a 0,50. O ISNA foi calculado pelo balanço hídrico considerando oito valores de AD (0,125; 0,25; 0,375; 0,625; 0,875; 1,25; 2,00 e 3,00 mm cm⁻¹) e uma profundidade efetiva do sistema radicular de 40 cm, resultando em uma capacidade de água disponível de 5 mm, 10 mm, 15 mm, 25 mm, 35 mm, 50 mm, 65 mm, 80 mm, 120 mm. Na sequência, foi avaliada a relação entre AD e Risco, de forma a identificar qual a variação máxima de AD que resultaria em uma variação de aproximadamente 5% no risco, permitindo estabelecer faixas de AD mais adequadas.

Foram realizados testes para quatro regiões geográficas com diferentes condições climáticas durante o período de cultivo: a) úmida, com precipitação até 100% superior à evapotranspiração de referência (ETo); b) moderadamente úmida, com precipitação até 50% superior à ETo; c) moderadamente seca, com precipitação até 20% superior à ETo; d) seca, com precipitação até 20% inferior à ETo. Em cada uma das regiões, o risco hídrico, definido pela frequência com que o ISNA da fase crítica foi inferior a 0,5, foi

estimado para oito valores de AD: 0,125; 0,25; 0,375; 0,625; 0,875; 1,25; 2,00 e 3,00 mm cm⁻¹. Na sequência, avaliou-se a relação entre AD e Risco, de forma a identificar qual a variação máxima de AD que resultaria em uma variação de aproximadamente 5% no risco, permitindo estabelecer faixas de AD mais adequadas.

Resultados e Discussão

Base de dados de AD e distribuição das amostras

A base de dados organizada, denominada BD-Zarc, contém 1.021 amostras com dados das frações areia total, silte, argila (%) e água disponível ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), essa última convertida para mm cm^{-1} . As faixas de valores dos parâmetros da base, bem como a distribuição de frequências são apresentadas na Tabela 4 e Figuras 7 e 8.

Tabela 4. Valores mínimo, médio, mediano e máximo para os parâmetros areia total, silte, argila e a água disponível na base BD-ZARC

Parâmetro	Mínimo	Médio	Mediano	Máximo
Areia total (%)	0	43	41	99
Silte (%)	0	26	19	79
Argila (%)	0	31	29	93
AD (mm cm^{-1})	0,05	1,14	1,01	2,50

Durante a composição da base, procurou-se obter dados em todas as classes granulométricas, abrangendo uma grande amplitude quanto à composição das frações granulométricas individuais. Dessa forma, a amplitude para os teores de areia total neste estudo foi de 0-99%; para os teores de silte, 0-79%, e, para os teores de argila, 0-93% (Tabela 4).

Um grande percentual das amostras da BD-ZARC apresenta baixos teores de silte, assim como um pequeno número de observações apresenta elevados teores de argila (Figura 7). A melhor distribuição percentual entre as amostras refere-se aos

teores de areia total, pois a maioria dos dados são oriundos, predominantemente, de regiões agrícolas e das classes de Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Neossolos.

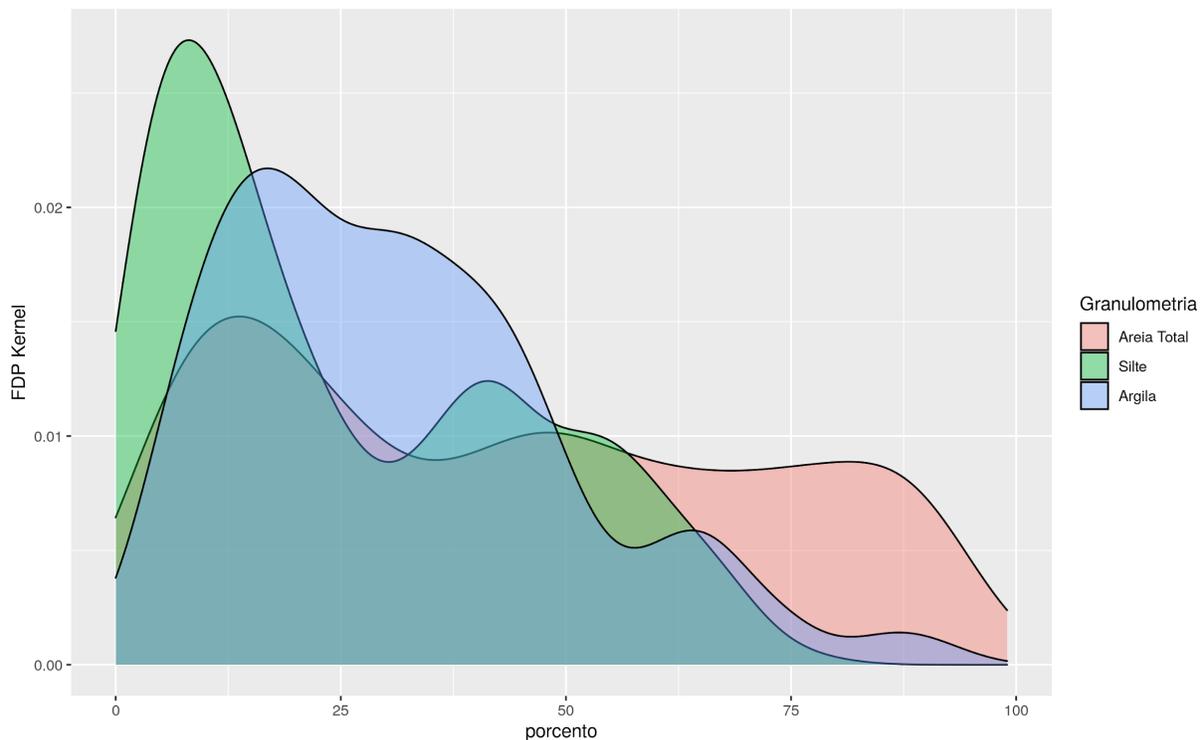


Figura 7. Distribuição dos valores de areia total, silte e argila na base de dados BD-Zarc, conforme função densidade de probabilidade (FDP Kernel).

Há raros dados disponíveis de amostras de AD com elevados teores de silte no Brasil, fato decorrente tanto da menor ocorrência dessa fração nos solos tropicais, como de poucos estudos em solos com essas características nas áreas agrícolas do território brasileiro. A maior parte dos dados com teores de silte acima de 50% são oriundos da base WOSIS. A fração silte geralmente compõe um pequeno percentual da composição granulométrica de solos intemperizados, como os Latossolos e grande parte dos Argissolos. Entretanto, algumas regiões do Brasil apresentam solos com elevados teores de silte, por exemplo, nas várzeas da Amazônia

que correspondem a uma área aproximada de 50.000 km² (Lima et al., 2007; Teixeira et al., 2019b), e solos da Formação Solimões, na parte ocidental da Amazônia (Coelho et al., 2005; Macedo; Teixeira, 2008; Schaefer et al., 2017; Kotlar et al., 2020). Contudo, essa região apresenta poucos estudos e baixo uso agrícola. Em relação às outras frações, a maior parte das amostras apresentam teores de argila inferiores a 50%.

Os valores de AD na BD-ZARC apresentaram uma amplitude com um valor mínimo de 0,03 mm cm⁻¹ até um valor máximo de 2,50 mm cm⁻¹. A maior frequência de valores se situa próximo a valores de 1,00 mm cm⁻¹ (Figura 8), o que atualmente se enquadra em solos tipo 1 e tipo 2, segundo os critérios do ZARC (Brasil, 2008).

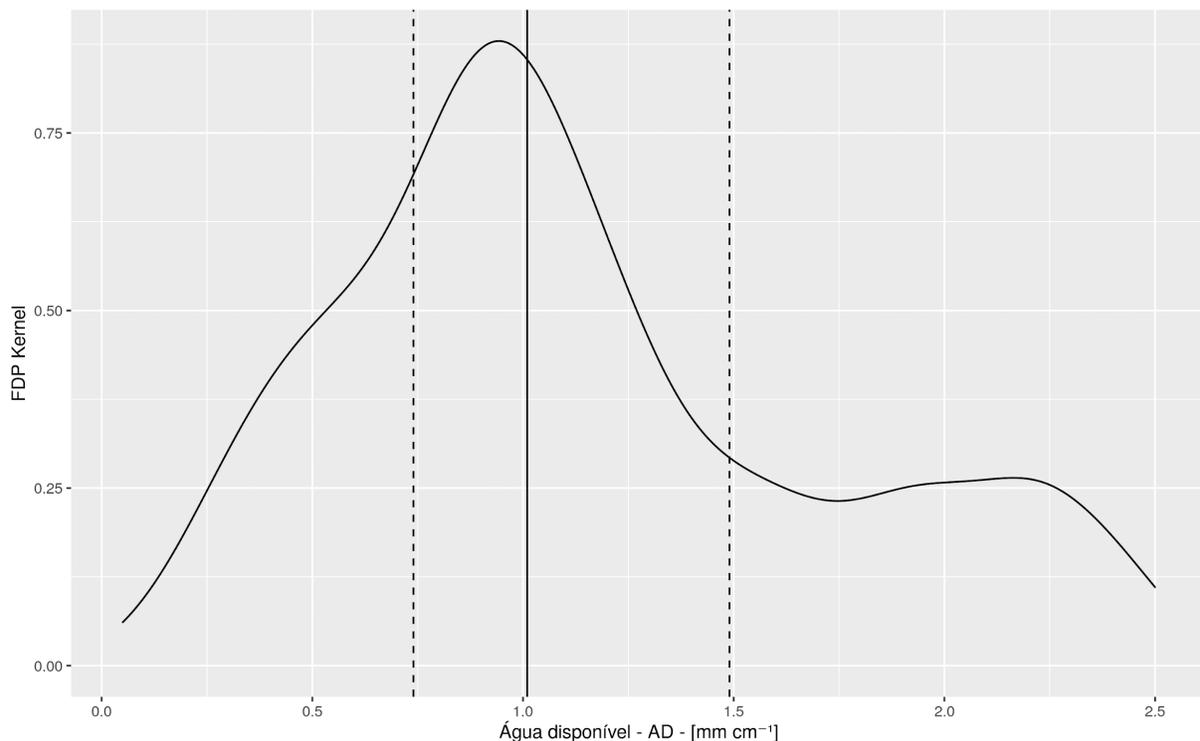


Figura 8. Distribuição dos valores observados de água disponível (AD) na base BD-ZARC, conforme função de densidade de probabilidade (FDP Kernel). Valor mediano de AD e quartis 25% e 75% são indicados pelas linhas verticais, contínua e tracejadas, respectivamente.

A relação entre AD e a composição granulométrica pode ser visualizada na distribuição dos valores de AD no gráfico ternário das frações granulométricas (Figura 9). Pode-se constatar que as amostras com maiores valores de AD são as que apresentam subgrupos texturais média-siltosa, siltosa e argilosa (Santos et al., 2018), enquanto, em solos com textura muito argilosa, o aumento do percentual de argila não se traduz num aumento direto da AD (Figura 10). Ocorrem valores relativamente menores de AD em solos com grande predomínio da fração argila (muito argilosos). Muitos solos muito argilosos bem estruturados normalmente apresentam elevados conteúdos de água na CC, mas também apresentam elevados conteúdos de água no PMP, resultando em valores médios de AD, segundo os critérios apresentados na Tabela 2. Tal constatação apresenta claro contraste em relação à regra atual de AD do ZARC (Brasil, 2008), onde todos os solos com mais de 35% de argila são considerados com elevados valores de AD ($1,5 \text{ mm cm}^{-1}$).

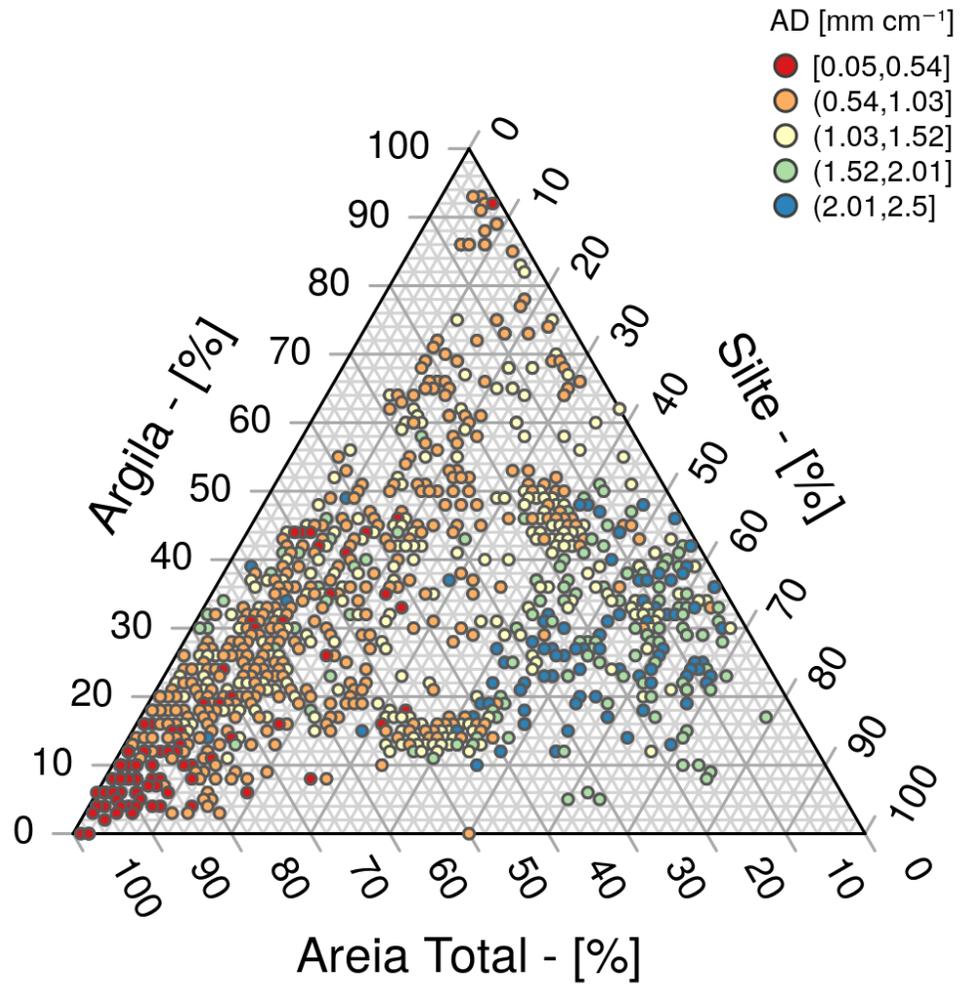


Figura 9. Gráfico ternário da distribuição dos dados de água disponível (AD) no BD-Zarc. As cores na legenda representam diferentes faixas de valores de AD observados.

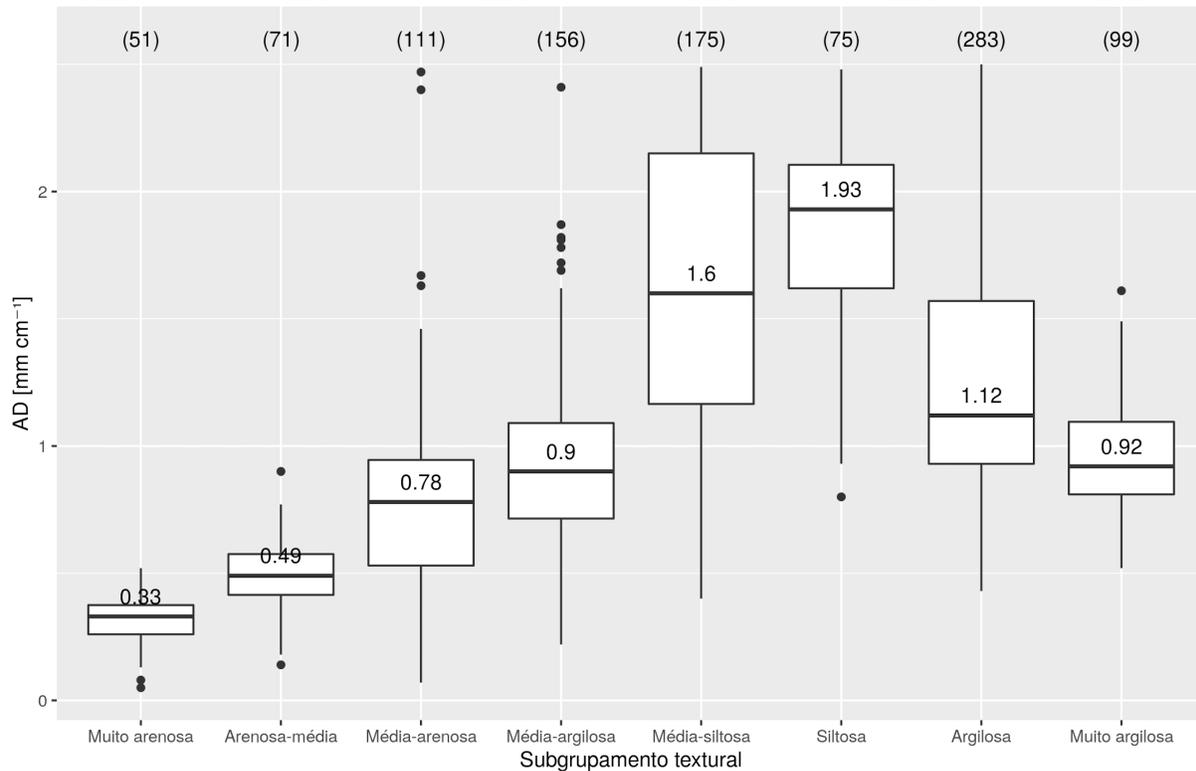


Figura 10. Distribuição da água disponível por subgrupamento textural na base de dados BD-Zarc utilizada para o desenvolvimento da PTF.

Muitos dos Latossolos Amarelos muito argilosos que predominam em grande parte da Amazônia Central apresentam elevada retenção de água no PMP (1.500 kPa), que condicionam valores médios de água disponível (Corrêa, 1984; Teixeira et al., 2001). A pressuposição de que solos de textura argilosa e muito argilosa apresentam sempre valores de AD elevados (Assad et al., 2008; Brasil, 2008) não se confirma tampouco em outras regiões do Brasil, como nos Latossolos Amarelos muito argilosos do Maranhão (Embrapa, 1991; Lumbreras, 1996; Teixeira et al., 2019b). Entretanto, alguns solos muito argilosos podem apresentar valores altos de AD (Marques et al., 2004; Teixeira et al., 2019b). Essa ambiguidade entre valores de AD e teores elevados de argila deverá ser mais bem ajustada com a inclusão de novos parâmetros nas

AD-PTFs. A regra de classificação dos valores de AD considerados muitos baixos até muito altos é apresentada na Tabela 2.

As incertezas das predições de AD podem ser visualizadas no gráfico ternário (Figura 6a - Apêndice) e todos os resultados das 5.151 combinações granulométricas podem ser acessados neste repositório: https://github.com/dvictori/ptf_zarc/blob/master/resultados/Preditos_triangulo_AD_m2.csv.

As predições da AD baseadas apenas em composição granulométrica têm uma menor precisão quando um dos preditores (argila, silte, areia total) assume percentuais maiores que 80%. Isso é verificado pelo aumento das incertezas das previsões, em especial na classe siltosa (Figura 6a - Apêndice). Todas as predições de AD pela PTF-ZARC bem como os intervalos limites inferiores e superiores num intervalo de confiança de 95% das estimativas podem ser verificados em https://github.com/dvictori/ptf_zarc/blob/master/resultados/Preditos_triangulo_AD_m2.csv.

A facilidade de consulta a tabelas sem necessidade de sistemas computacionais pode ser uma vantagem em determinadas situações. Adicionalmente, ajustes nos valores de AD para algumas combinações granulométricas, ou mesmo ajustes específicos por região, podem ser facilmente realizados com a modificação dos valores na tabela.

Os menores valores de AD observados são dos solos das classes texturais areia e areia franca (Figura 10). Entretanto, alguns solos, em especial os da classe areia franca, podem apresentar valores de AD um pouco superiores em função de características específicas

relacionadas, provavelmente a maiores teores de areia fina e carbono.

O efeito da composição granulométrica isoladamente como preditor da AD é bastante complexo quando consideramos que solos com a mesma composição podem apresentar um espaço poroso diferente e com tamanho de poros diferenciados. Tais diferenças estruturais apresentam um grande efeito na água retida na CC. Solos com os mesmos teores de argila, mas com partículas de tamanhos diferentes ou mineralogia distinta (p. ex., solos cauliníticos e esmectíticos), podem apresentar valores de AD diferentes, em consequência principalmente da água retida por processos de adsorção na superfície das argilas. Esse efeito é verificado na retenção em altos potenciais. Os autores deste estudo estão cientes de que não é possível abarcar toda a complexidade que envolve os fenômenos da retenção de água apenas com as relações entre sua composição granulométrica. Ou seja, o uso da AD-PTF simplificada não será tão precisa quanto a estimativa da AD avaliada via coleta e análise ou pelo uso de AD-PTFs mais complexas, que utilizam um maior número de parâmetros do solo, em especial os correlacionados à estrutura do solo e à geometria do sistema poroso. Dessa forma, devem ser considerados mecanismos para que o produtor, ao realizar seu contrato de seguro rural, possa apresentar dados e informações que permitam a melhor predição da AD de seu talhão.

Uma segunda base de dados, denominada DB-Independente, composta por dados não utilizados no desenvolvimento da PTF-ZARC, contém 151 amostras. A faixa de valores e a distribuição de frequências das variáveis preditoras e dos valores de AD são apresentados na Tabela 5 e Figuras 11 e 12.

Tabela 5. Valores mínimo, médio, mediano e máximo para os parâmetros areia total, silte, argila e a água disponível na base BD-Independente.

Parâmetro	Mínimo	Médio	Mediano	Máximo
Areia total (%)	2	74	87	97
Silte (%)	0	7	5	49
Argila (%)	2	19	9	92
AD (mm cm ⁻¹)	0,26	1,06	0,96	2,98

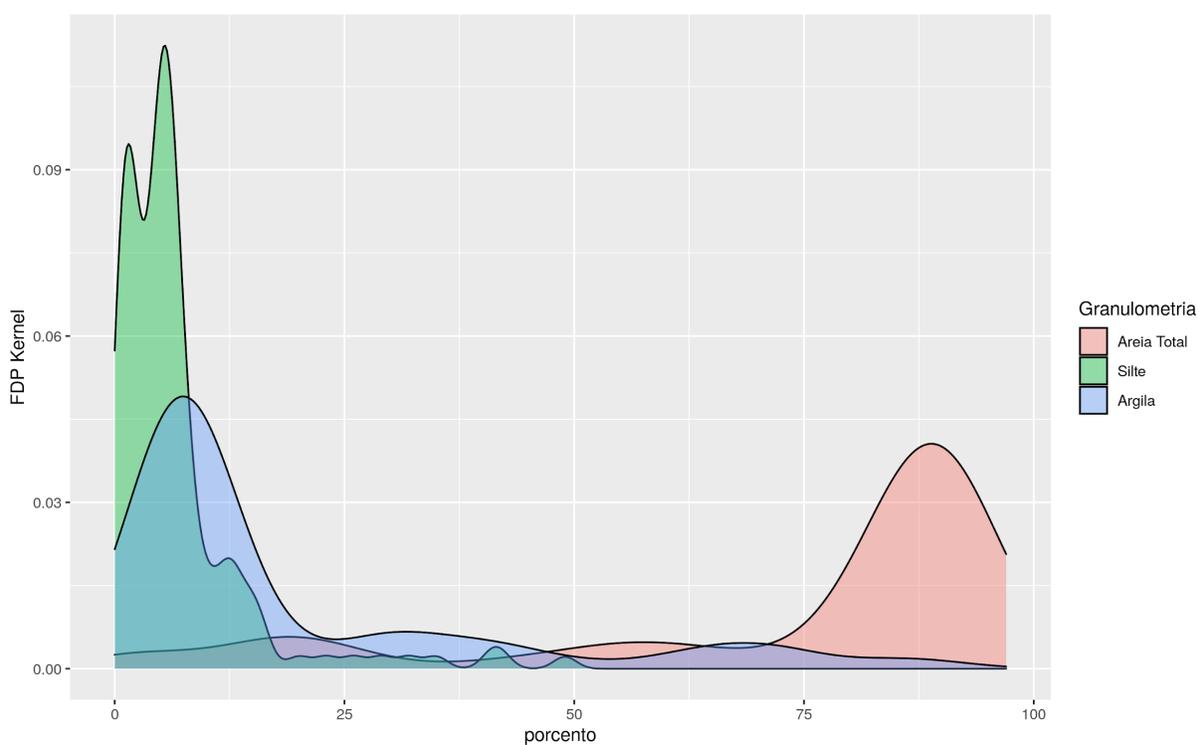


Figura 11. Distribuição dos valores de areia total, silte e argila na base BD-Independente, conforme função densidade de probabilidade (FDP Kernel).

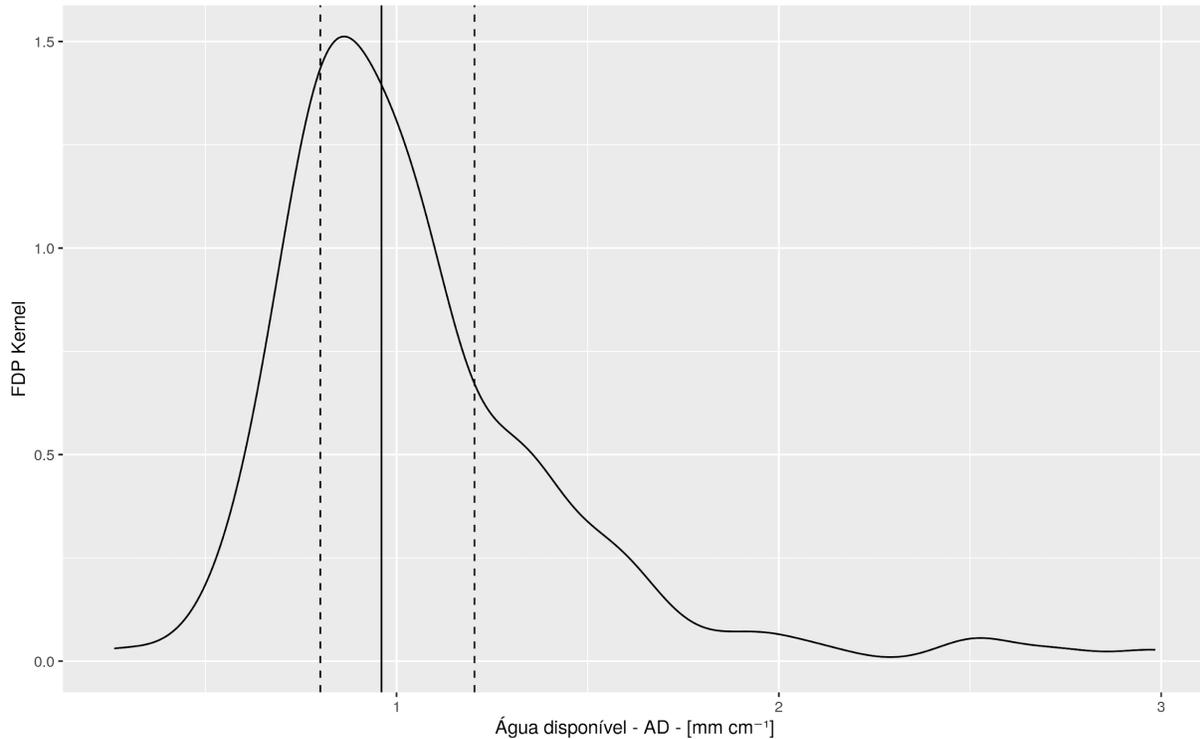


Figura 12. Distribuição dos valores observados de água disponível (AD) na base BD-Independente, conforme função densidade de probabilidade (FDP Kernel). Valor mediano de AD e quartis 25% e 75% são indicados pelas linhas verticais, contínua e tracejadas, respectivamente.

É possível notar que a BD-Independente possui uma maior proporção de amostras arenosas e com baixos teores de silte e argila (Figura 11). Isso pode representar um desafio para a PTF desenvolvida, que foi baseada em um conjunto de amostras mais homogêneo em relação à granulometria.

O mesmo também ocorre com os dados de AD (Figura 12), que, apesar da maior amplitude de valores em relação à base BD-ZARC (0,26 a 2,98 mm cm⁻¹ no BD-Independente vs. 0,05 a 2,50 mm cm⁻¹ no BD-ZARC), apresentam maior concentração de amostras com AD em torno de 0,9 mm cm⁻¹.

O gráfico ternário da BD-Independente (Figura 13) também evidencia a maior quantidade de amostras arenosas e poucas com teores de silte acima de 35%. As amostras do BD-Independente apresentam em média valores de AD superiores aos maiores valores de AD encontrados na BD-ZARC, evidenciando a diferença entre os dados utilizados no desenvolvimento da PTF-ZARC e a base independente usada para validação.

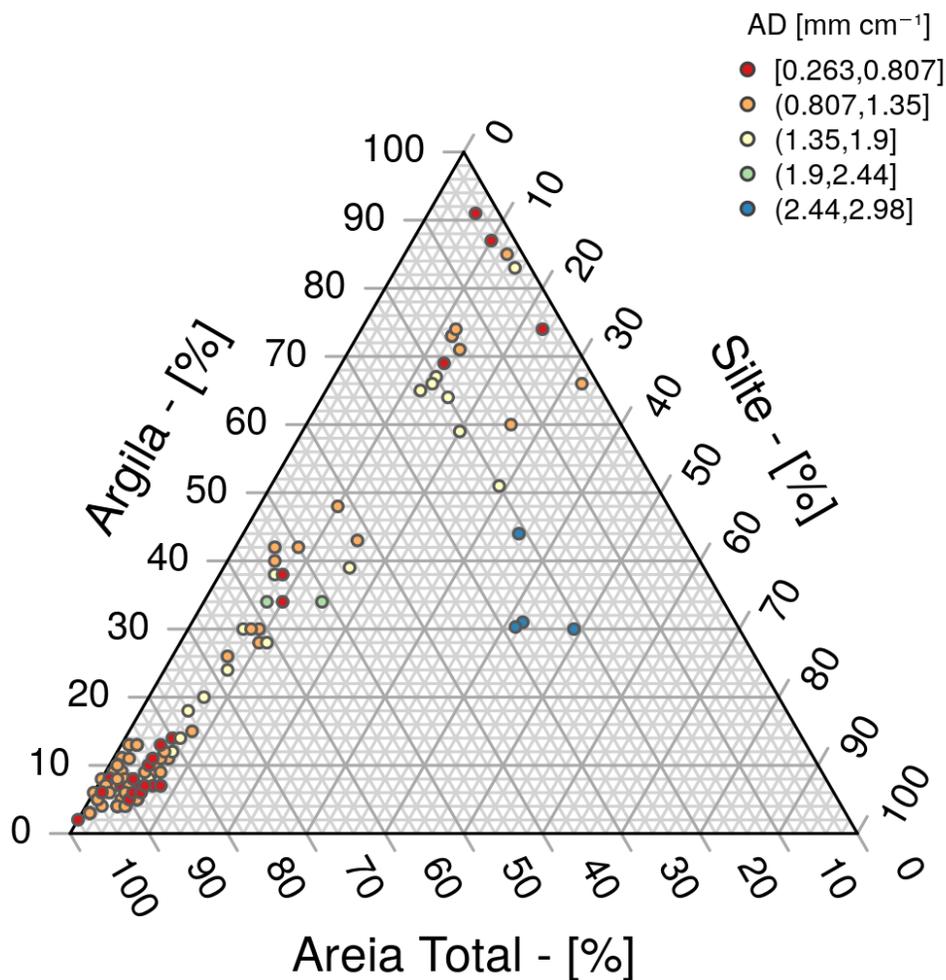


Figura 13. Gráfico ternário da distribuição dos dados de AD na BD-Independente.

A maior concentração de valores de AD em torno de $0,9 \text{ mm cm}^{-1}$ e a menor variação faz com que a AD mediana dos subgrupos texturais na BD-Independente seja maior que o encontrado na BD-ZARC (Figura 14). Também fica evidenciada a discrepância dos dados do subgrupamento médio-siltoso. No entanto, assim como na BD-ZARC, é possível identificar que as ADs dos subgrupamentos muito argiloso e argiloso apresentam valores semelhantes aos do subgrupamento médio-arenoso – um claro contraste em relação às regras atuais do ZARC, onde todos os solos com mais de 35% de argila são considerados com valores de AD igual a $1,5 \text{ mm cm}^{-1}$.

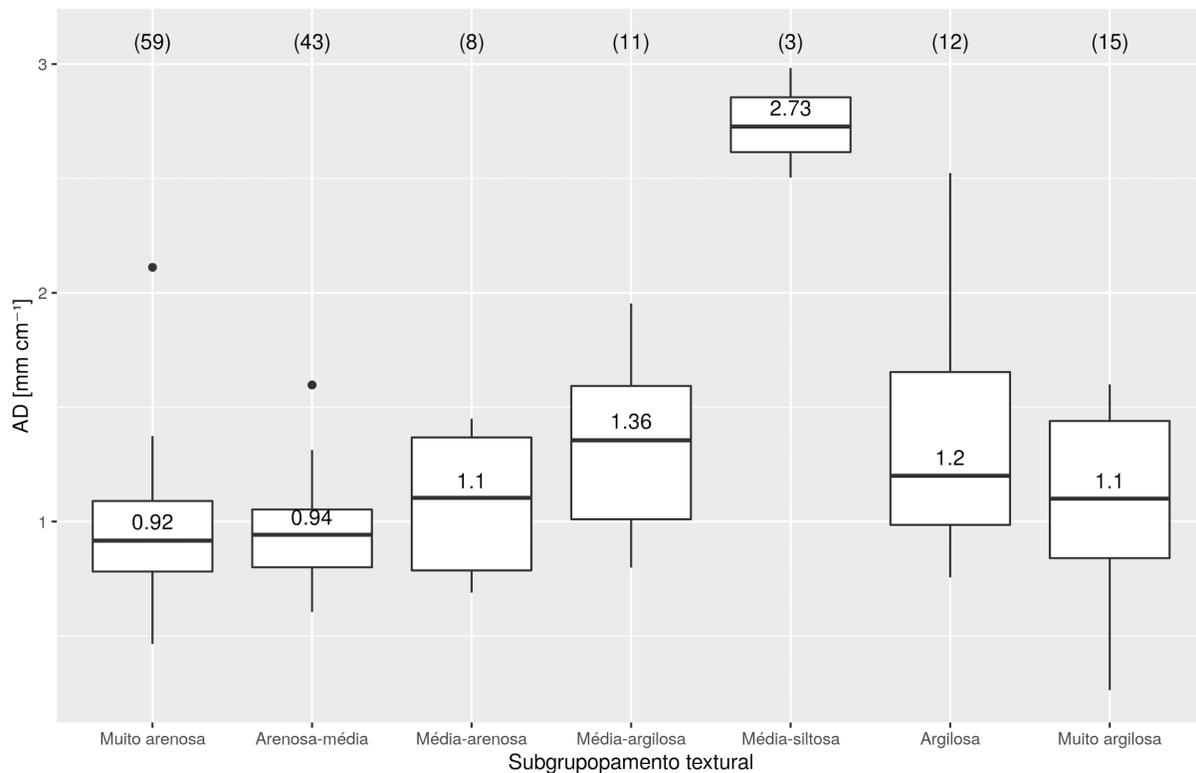


Figura 14. Distribuição da água disponível por subgrupo textural na base BD-independente. Números entre parênteses apresentam o número de amostras em cada subgrupamento.

Ajuste da Equação PTF preditiva de AD baseado apenas em dados granulométricos

Foram avaliados dois modelos preditivos para a AD. O primeiro (AD-PTF m1) utilizou como parâmetros preditores os teores de areia total (AT), silte (SILTE) e argila (ARG) e as combinações de interações duplas e triplas entre os fatores (modelo de mistura). Foram determinados os coeficientes dos fatores e sua significância pelo teste *t*. Observa-se no quadro da análise da variância que os coeficientes da interação SIL*ARG e SIL*AT não são significativos (Tabela 1a - Apêndice). Adicionalmente, pela análise dos gráficos *Quantil-Quantil* (Q-Q), observa-se um desvio da normalidade com o afastamento dos resíduos da reta pontilhada. O gráfico de dispersão da raiz quadrada do valor absoluto do resíduo padronizado *versus* os valores preditos indica heterocedasticidade (Figura 1a - Apêndice). A análise de dispersão de resíduos *versus* valores preditos mostra que o ajuste é satisfatório com os resíduos distribuídos com dispersão em torno do valor 0. Os gráficos de dispersão do resíduo padronizado *versus leverage* com a distância de Cook e o gráfico de dispersão da distância de Cook *versus leverage* para o modelo PTF AD m1 (dados sem transformação) não indicaram observações influentes, que alavancassem (*leverage*) os modelos ajustados (s).

Devido aos desvios da normalidade e da homogeneidade de variância, optou-se por fazer a transformação dos valores observados de AD segundo os procedimentos indicados por Box e Cox (1964). Para tal, foi determinado e utilizado o parâmetro de transformação $\lambda = 0,3451$ (Figura 2a - Apêndice). Um novo modelo foi ajustado (AD-PTF m2), sendo significantes nesse modelo todos os coeficientes dos parâmetros preditivos e suas interações

duplas e triplas (Tabela 1a e 2a - Apêndice). Houve também um aumento na R^2 , que foi de 0,72 no m1 (Tabela 1a) e de 0,99 no m2 (Tabela 2a - Apêndice). A análise das pressuposições não indica violações aos pressupostos de modelos lineares e que se pode utilizar a equação AD-PTF m2 para as estimativas de AD (Figura 2a - Apêndice). Os resíduos da equação AD-PTF m2 apresentam uma distribuição mais próxima da normalidade, o que pode ser verificado no gráfico Q-Q (Figura 3a - Apêndice). A maior homogeneidade de variância em relação ao modelo com dados não transformados é indicada pela análise comparativa entre os gráficos de dispersão da raiz quadrada do valor absoluto do resíduo padronizado *versus* os valores preditos dos modelos com e sem transformação (Figura 2a - Apêndice). A análise dos resíduos e dos dados influentes do modelo AD-PTF m2 é bastante similar ao do modelo AD-PTF m1 quando avaliados os dados sem ajuste.

Os parâmetros de acurácia da AD-PTF m2, doravante denominada de PTF-ZARC, apresentaram um RMSE de 0,036 cm³ cm⁻³ após a destransformação dos dados. O coeficiente de correlação (R - Equação 8) entre os dados de AD_{cal} pelo PTF-ZARC e AD observados foi de 0,78 (Figura 3a - Apêndice) e o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,99 (Tabela 2a – Apêndice)

A equação PTF-ZARC para a predição da AD (mm cm⁻¹) para os solos do Brasil com base unicamente em dados da composição granulométrica de areia total, silte e argila (%) é apresentada na Equação 9:

$$AD = \{ 1 + [0,35941*(-0,02128887*AT - 0,01005814*SIL - 0,01901894*ARG + 0,0001171219*(AT*SIL) + 0,0002073924*(AT*ARG) + 0,00006118707*(SIL*ARG) - 0,000006373789 * (AT*SIL*ARG))] ^ 2,78474 \} * 10$$

Equação 9

Os valores de AD preditos pela PTF-ZARC (Equação 9) podem ser visualizados na forma de um gráfico ternário de granulometria, com a legenda na escala de valores de AD (Figura 15).

Modelo m2

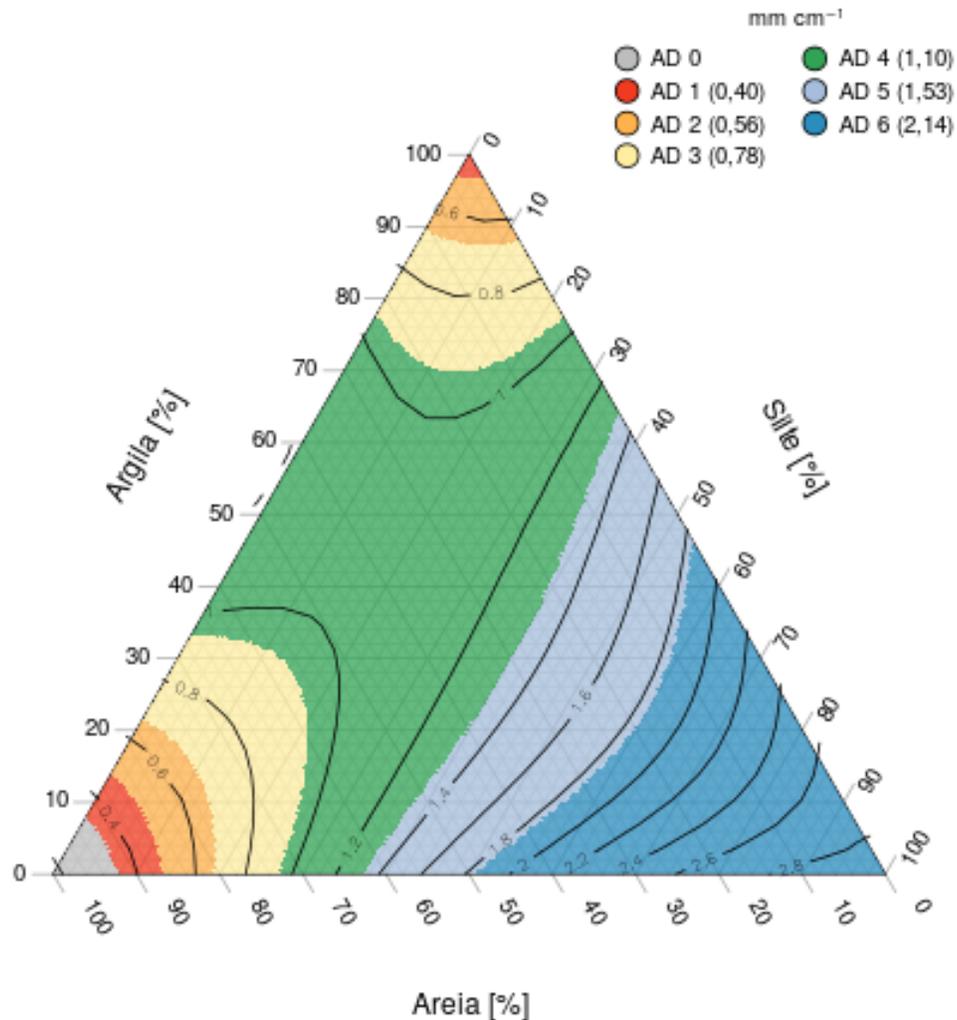


Figura 15. Gráfico ternário granulométrico com valores de AD calculada pela PTF-ZARC para todas as combinações granulométricas (5151). A legenda apresenta os valores de AD agrupados, conforme nova proposta de classes de AD para o ZARC.

O resultado da PTF-ZARC, baseada nas frações areia total, silte e argila, apresenta um claro contraste em relação à regra de três tipos de solos (Figura 16) publicada na Instrução Normativa 2 de 09/10/2008 (Brasil, 2008), que classifica os solos principalmente em relação aos teores de argila, não havendo uma classificação para os solos com menos de 10% de argila, e tratando todos os solos com mais de 35% de argila como tendo um valor único de AD de 1,5 mm

cm⁻¹. Adicionalmente, a norma atual (Brasil, 2008) leva apenas parcialmente em consideração diferenças nos teores de silte (fator delta). Os dados de AD observados indicam que os maiores valores são encontrados nos subgrupos texturais siltoso e médio-siltoso (Figura 10). Essa tendência foi captada pelo modelo aqui desenvolvido (Figura 15).

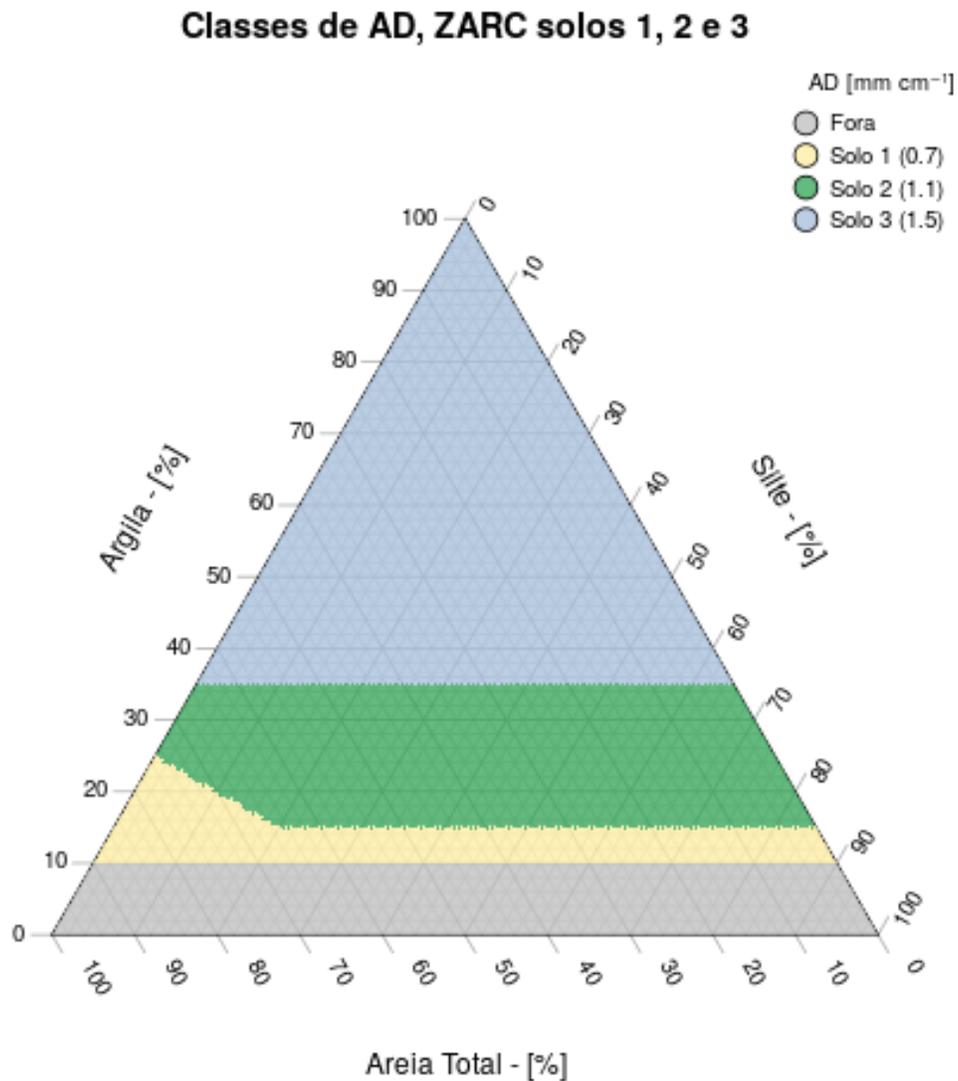


Figura 16. Gráfico ternário granulométrico com valores de AD e tipos de solo definidos no ZARC pela Instrução Normativa n. 2, de 09/10/2008 (Brasil, 2008).

Uma análise da distribuição dos dados de ADcal (Figura 17) mostra que a PTF-ZARC prediz, para cerca da metade (50%) das combinações granulométricas, valores de AD iguais ou inferiores a 1,14 mm cm⁻¹ e, para 75% das combinações, prediz valores de AD iguais ou inferiores a 1,64 mm cm⁻¹. Entretanto, a distribuição dos valores de ADs de acordo com os subgrupos texturais (Figura 18) mostra que o modelo foi capaz de captar a menor diferença na AD entre os solos de textura média e argilosa ou muito argilosa, sendo os maiores valores de AD encontrados nos solos dos subgrupos texturais médio-siltosos e siltosos.

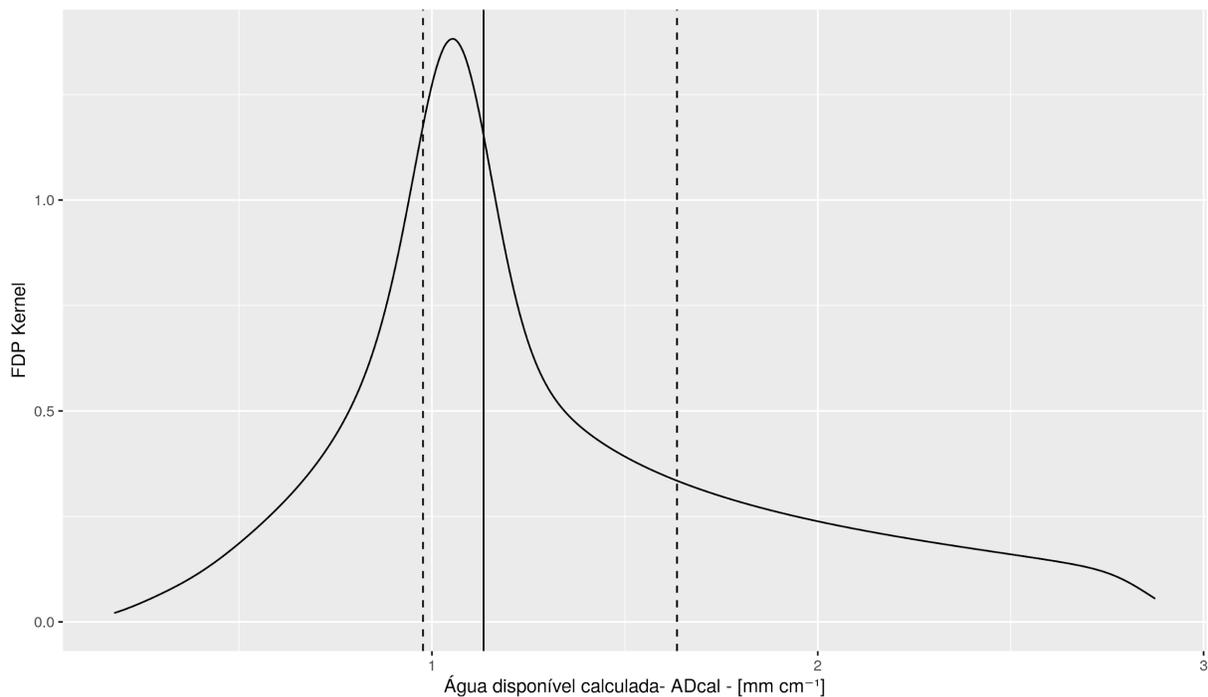


Figura 17. Distribuição dos valores calculados de água disponível (AD cal) para todo o triângulo textural, conforme função densidade de probabilidade (FDP Kernel). Valor mediano de AD e quartis 25% e 75% são indicados pelas linhas verticais, contínua e tracejadas, respectivamente.

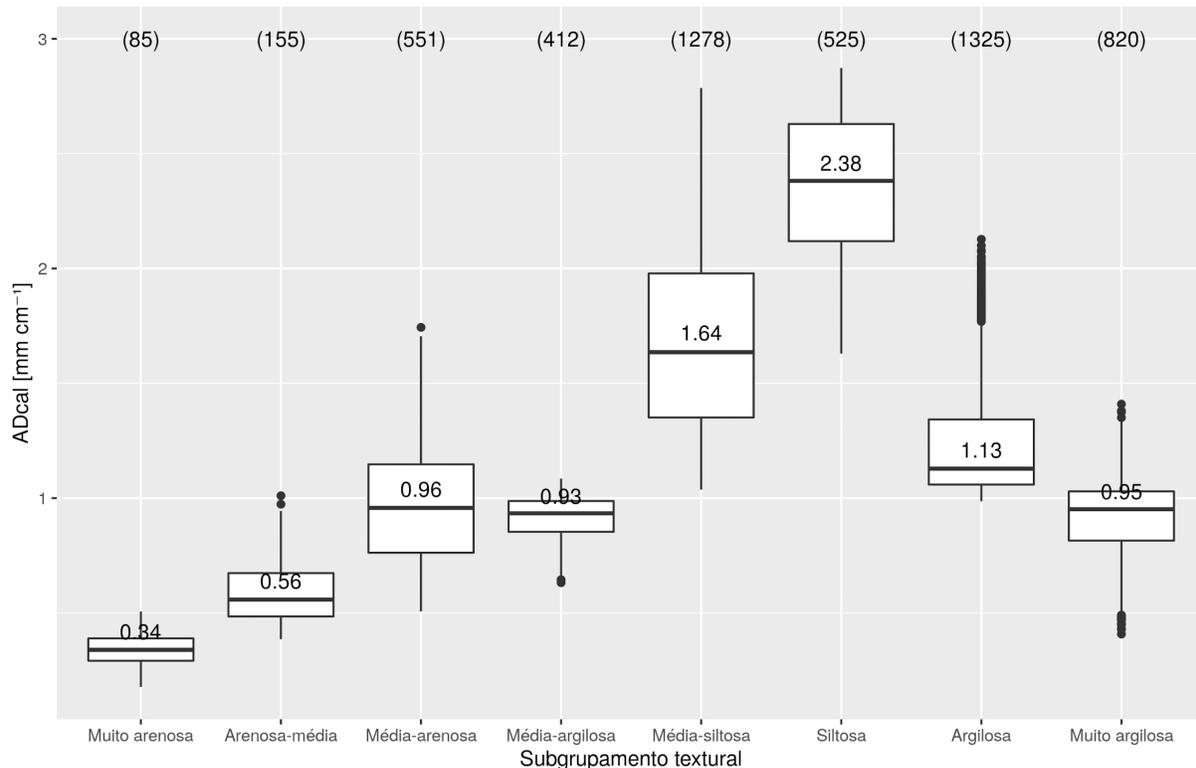


Figura 18. Distribuição da AD calculada (ADcal) para todo o triângulo textural por subgrupamento textural. Números entre parênteses indicam o número de amostras em cada subgrupamento textural.

Validação da Equação PTF-ZARC

A verificação da acurácia da PTF-ZARC foi realizada através de três procedimentos. Inicialmente, através da validação cruzada i) k-fold, com 20 subconjuntos. Por esse procedimento, a média dos resultados obtidos apresentou $RMSE = 0,37 \text{ mm cm}^{-1}$ [$0,037 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$]. Esse resultado é próximo ao obtido pela Equação 9 (PTF-ZARC), que foi de $0,36 \text{ mm cm}^{-1}$.

No segundo procedimento, foi feita uma comparação das predições da AD pela PTF-ZARC com outras PTFs. Para assegurar a validade da comparação, na seleção dos valores de AD observados, foi selecionada a mesma amplitude de valores

granulométricos para as quais as PTFs foram desenvolvidas (Tabela 6). A PTF-ZARC contempla uma faixa granulométrica mais ampla que as outras equações testadas, que apresentam um domínio mais restrito. Dessa forma, a comparação foi realizada em um subconjunto do BD-ZARC contendo 462 amostras que contemplavam toda a amplitude de todas as PTFs em comparação (Tabela 7).

Tabela 6. Classes granulométricas das amostras utilizadas para o desenvolvimento de funções transferidoras para estimativa de água disponível (AD).

PTF	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
PTF-ZARC	0 a 99	0 a 79	0 a 93
Assad et al. (2001)	2 a 92	0 a 56	5 a 86
Giarola et al. (2002)	3 a 78	10 a 42	6 a 81
Berg (1997)	-	-	2 a 95

Tabela 7. Coeficientes de ajuste R e RMSE para a PTF-ZARC e outras PTFs.

Modelo	N	R	RMSE (mm cm ⁻¹)
PTF-ZARC	1021	0,78	0,37
PTF-ZARC (base reduzida)	468	0,35	0,35
Assad et al. (2001)	468	0,16	0,39
Giarola et al. (2002)	468	-0,06	0,45
Berg et al. (1997)	468	-0,06	0,42
ZARC - atual Brasil (2008)	468	0,05	0,52

Resultados para a PTF-ZARC foram obtidos por validação cruzada usando o BD-ZARC completo (n = 1021). Já a comparação com outras PTFs deve ser feita utilizando a base filtrada para o domínio de aplicação das equações (n = 468).

Ao reduzir o número de amostras para a comparação com as outras PTFs, o R obtido pela PTF-ZARC reduziu seu valor, mas ainda indica a superioridade desta equação nas previsões, que é corroborado também pelo menor valor do RMSE (Tabela 7). A base de dados reduzida apresenta menor variação da granulometria, sem apresentar redução na amplitude dos dados de AD (Figura 19), contendo elevada variação das observações de AD e menor variação granulométrica. Por esse motivo, tanto a PTF-ZARC quanto as outras PTFs utilizadas na comparação têm dificuldade em estimar as ADs de forma satisfatória. No entanto, mesmo com tal limitação, a PTF desenvolvida apresentou o melhor desempenho. Essa comparação, utilizando um subgrupo do BD-ZARC, é enviesada estatisticamente, mas complementa e ilustra os outros procedimentos utilizados pela validação do modelo. De forma a ilustrar as diferenças nas estimativas da AD, utilizando a regra atual do ZARC para estimar AD (Brasil, 2008) e as estimativas pela PTF-ZARC, gerou-se um gráfico de correlação 1:1 entre dados preditos e observados de AD (Figura 20)

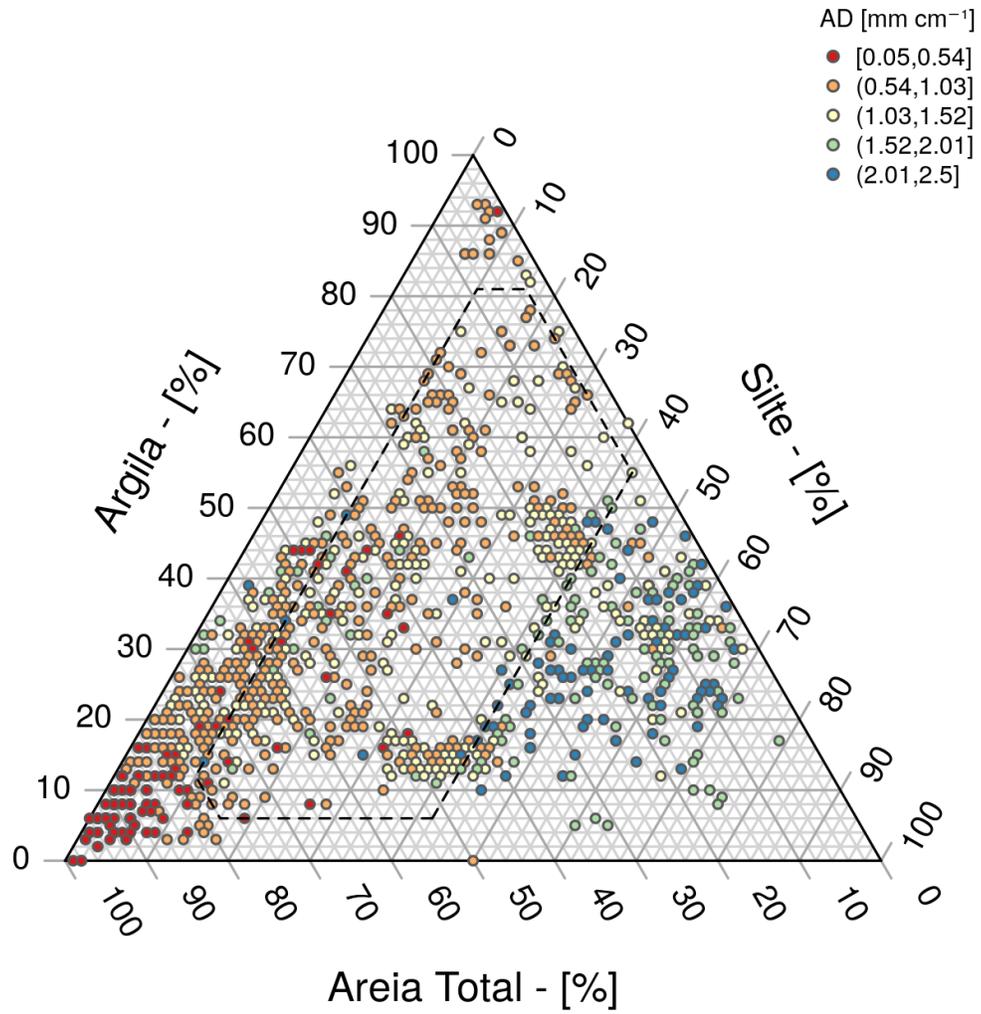


Figura 19. Localização das amostras do BD-ZARC no gráfico ternário com destaque (linha preta tracejada) para as amostras que se enquadram na faixa de valores das PTFs testadas.

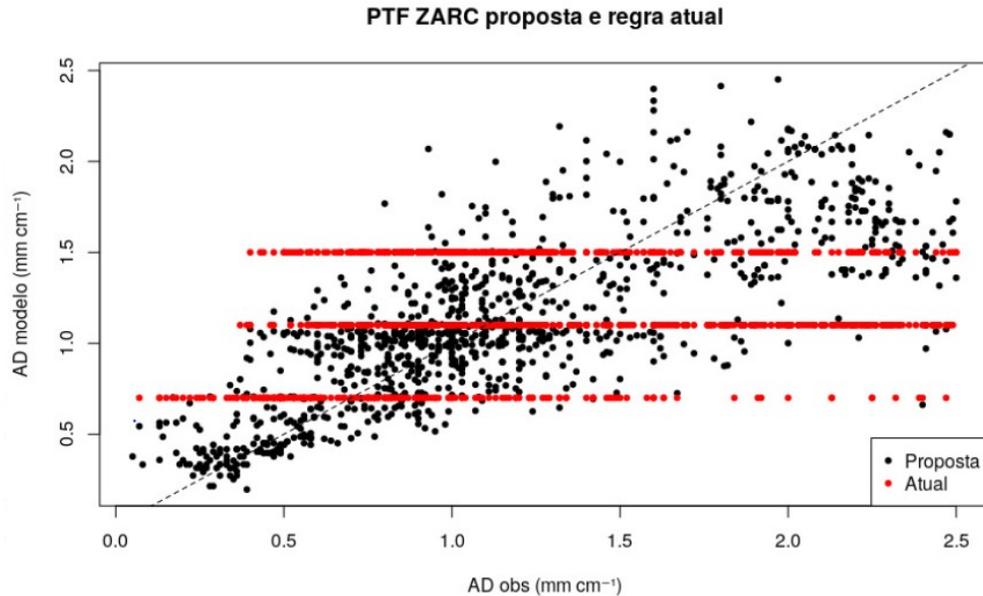


Figura 20. Gráfico de correlação (1:1) entre dados observados e gerados pela PTF-ZARC (pontos pretos) e pelas regras do ZARC atual para estimar AD (Brasil, 2008) (pontos vermelhos).

Validação da PTF-ZARC com uma base de dados independente (BD-Independente)

O terceiro procedimento de validação utilizado foi o uso de um BD-Independente com 121 observações não utilizadas na calibração da PTF-ZARC (Equação 9). Essa BD contém uma maior proporção de dados arenosos e menor amplitude nos dados de AD. Dessa forma, a PTF desenvolvida apresentou desempenho reduzido, indicado pelo maior valor do RMSE em relação à do BD-ZARC. No entanto, o valor de RMSE da PTF-ZARC foi o menor em relação às outras PTFs comparadas e a regra atual utilizada no ZARC. O parâmetro R indica, de forma mais clara, o melhor desempenho da PTF-ZARC em comparação às outras PTFs testadas (Tabela 8). A comparação com outras PTFs foi feita utilizando apenas amostras que atendiam à regra de domínio da composição granulométrica de todas as equações ($n = 24$).

Tabela 8. Coeficientes de correlação (R) e Erro Quadrático Médio (RMSE) calculados para as diferentes PTF utilizadas para estimativa de AD baseadas apenas em dados granulométricos.

Modelo	n	R	RMSE (mm cm⁻¹)
PTF-ZARC (bd-independente)	162	0,61	0,59
PTF-ZARC (bd- independente reduzido)	24	0,77	0,65
Assad et al. (2001)	24	0,07	0,61
Giarola et al. (2002)	24	-0,51	0,66
van den Berg et al. (1997)	24	-0,51	0,68
ZARC - atual Brasil (2008)	24	-0,37	0,65

Proposição de faixas de água disponível (AD) para uso nas avaliações de risco climático

A partir da análise de sensibilidade, foi possível identificar a relação entre o risco hídrico e a AD (Figura 21), com maiores riscos nas regiões mais secas e com menor AD.

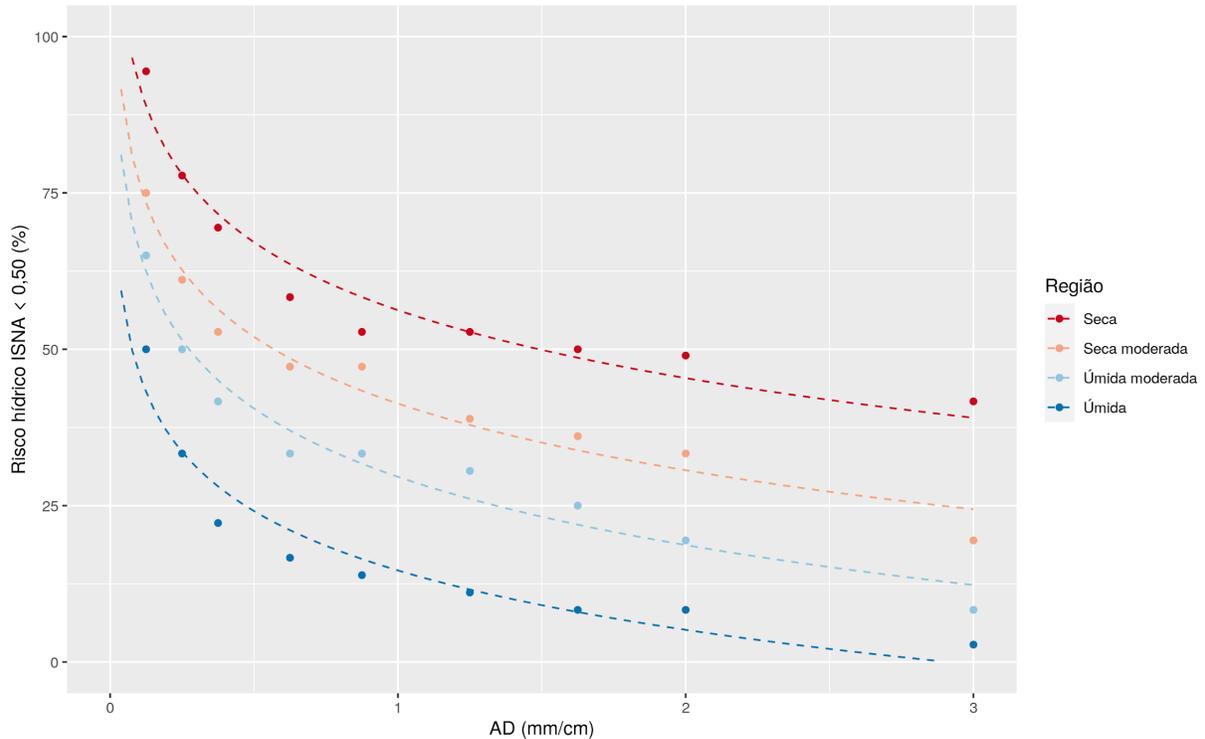


Figura 21. Variação do risco hídrico (ISNA < 0,50) observado em função da água disponível (AD) para a cultura da soja, estimado em quatro regiões, variando entre condição seca e alto risco hídrico e condição mais úmida e com baixo risco.

É possível constatar que, apesar da grande diferença de risco entre as regiões para uma mesma AD, a diferença entre uma determinada AD e a imediatamente superior ou inferior apresenta pouca alteração, independentemente da região testada (Figura 22). Isso permite que seja adotado um gradiente médio único para representar a diferença do risco entre ADs diferentes, independentemente da condição hídrica do ambiente testado.

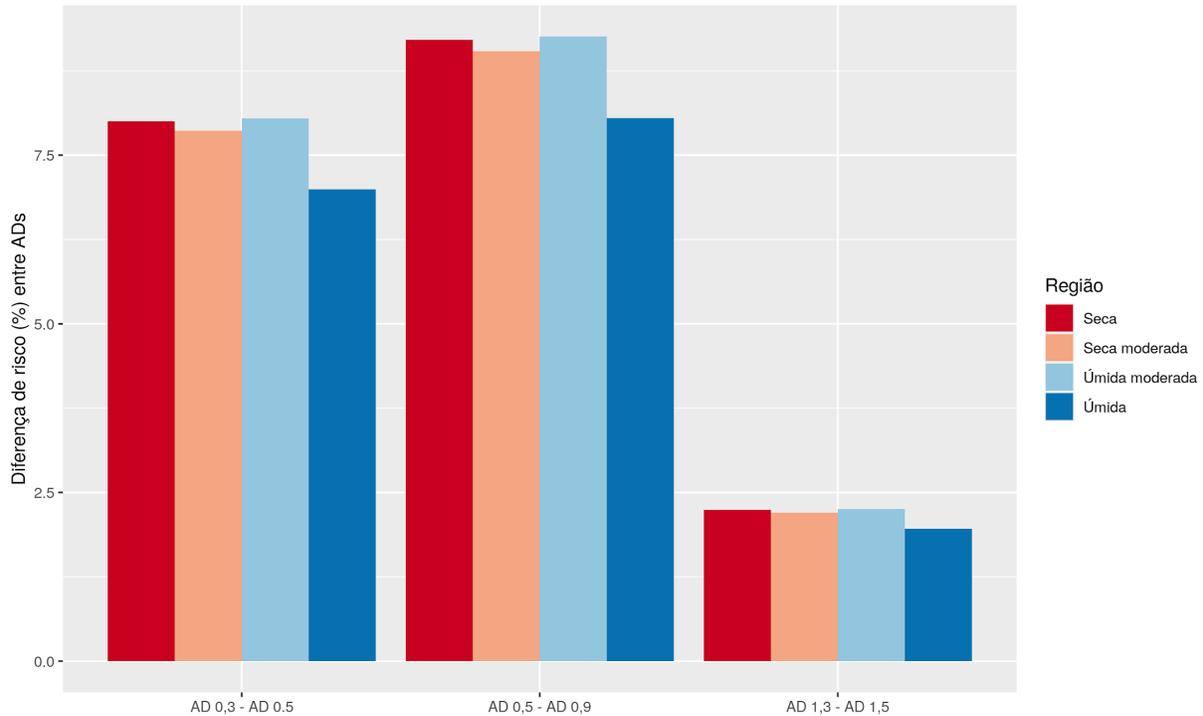


Figura 22. Gráfico de barras mostrando a diferença do risco hídrico (ISNA < 0,50) entre duas classes adjacentes de água disponível (AD) para a cultura da soja, estimado em quatro regiões nas condições seca (alto risco hídrico), seca moderada, úmida moderada e úmida (baixo risco).

As classes de risco tradicionalmente adotadas no ZARC variam num intervalo mínimo de 10%. Atualmente, são utilizadas as faixas de 20% (1% a 20%), 30% (21% a 30%) e 40% (31% a 40%). No sistema atual, são considerados três tipos de solo, com ADs de 0,7 mm cm⁻¹; 1,1 mm cm⁻¹ e 1,5 mm cm⁻¹. O solo tipo 1 (0,7 mm cm⁻¹) representa um intervalo de AD compreendido entre 0,5 mm cm⁻¹ e 0,9 mm cm⁻¹, o que representa uma variação no risco dentro da classe de aproximadamente 9% (Figura 23). Tal variação aumenta a probabilidade de agrupamento dos solos dentro de uma mesma classe de AD que deveriam ser classificados em diferentes faixas de risco. Dessa forma, é desejável reduzir o intervalo entre as classes de AD.

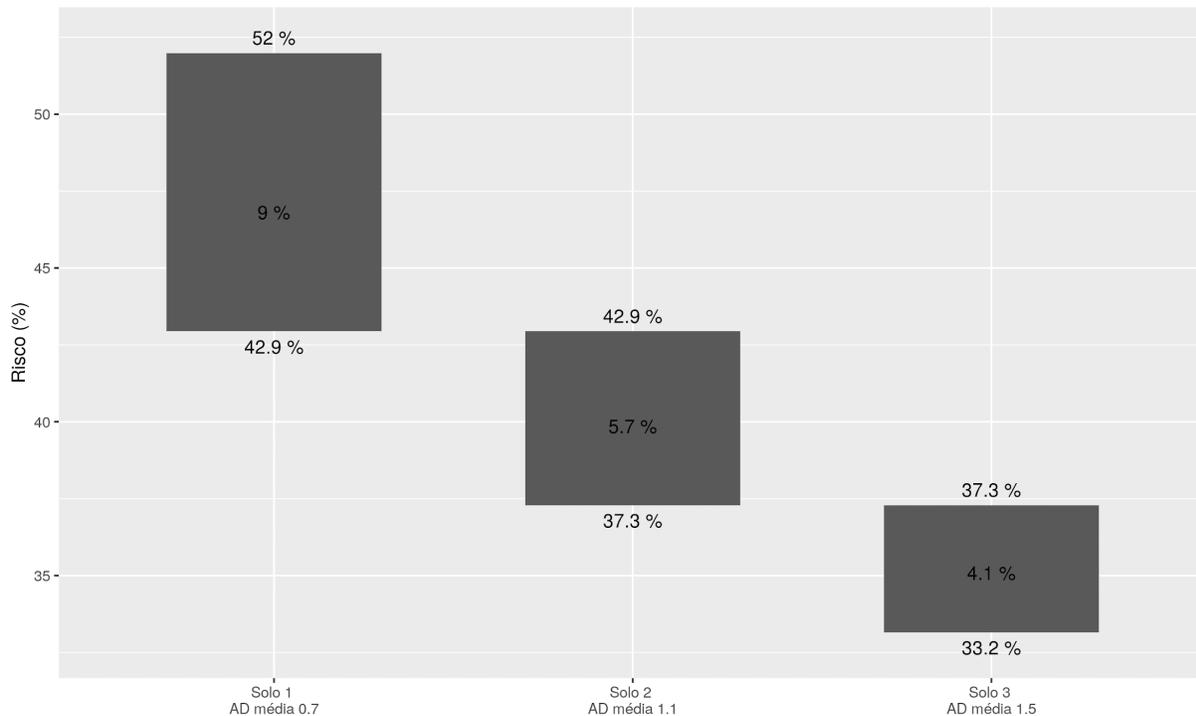


Figura 23. Histograma com valor mínimo, amplitude e valor máximo do risco correspondente às ADs para solos tipo 1, 2 e 3 (intervalo de AD constante e intervalo de risco variável), conforme classificação dos solos do ZARC, segundo a Instrução Normativa nº 2, de 09/10/2008 (Brasil, 2008). Risco estimado para cultura da soja em região de clima seco moderado.

Por outro lado, a redução do intervalo admitido entre uma classe de AD e outra exigirá um maior número de classes a ser simulado no ZARC, para representar adequadamente a variação possível encontrada no campo. Esse intervalo não deve ser muito amplo, pois resulta em maior incerteza, e nem demasiado estreito, pois resultaria em um número excessivo de categorias, prejudicando o processamento operacional dos estudos de ZARC.

A partir das relações AD *versus* risco, estabelecidas pelas regressões lineares (Figura 21), para se manter uma diferença máxima constante de, por exemplo, 5% de risco entre uma AD e outra, a diferença entre ADs deve ser de aproximadamente 30%.

Por exemplo, a partir de uma AD inicial de $0,4 \text{ mm cm}^{-1}$ (risco de cerca de 55% em clima seco moderado), a seguinte será de aproximadamente $0,56 \text{ mm cm}^{-1}$ (risco de cerca de 50% em clima seco moderado).

Para contemplar grande parte da variação de AD dos solos brasileiros, o intervalo de AD de $0,35 \text{ mm cm}^{-1}$ a $2,50 \text{ mm cm}^{-1}$ foi dividido em seis classes com variação de 40% entre elas. Os limiares de cada classe foram aproximados e um valor de referência, próximo ao valor médio da classe, foi utilizado para o cálculo dos riscos (Tabela 9). Dessa forma, para a classe AD 1, o valor de AD utilizado foi de $0,40 \text{ mm cm}^{-1}$.

Tabela 9. Valores de referência, mínimos e máximos da água disponível para seis classes a serem utilizadas nas modelagens de risco climático (ZARC).

Classe de AD	AD (mm cm^{-1})			Correspondência com classe de AD atual no ZARC
	Mínimo	Valor de referência	Máximo	
AD 1	0,34	0,40	0,48	Não representada
AD 2	0,48	0,56	0,67	Solo 1
AD 3	0,67	0,78	0,94	Solo 1
AD 4	0,94	1,10	1,32	Solo 2
AD 5	1,32	1,53	1,84	Solo 3
AD 6*	1,84	2,14	2,57	Não representada

*Solos com $AD > 2,57 \text{ mm cm}^{-1}$ serão considerados da classe AD 6.

Os efeitos do maior número de classes de AD do solo são resumidos nas Figuras 23 e 24, que apresentam a variação do risco, considerando a amplitude das faixas de AD no modelo atual e o

intervalo de AD considerado em cada uma das novas faixas, respectivamente.

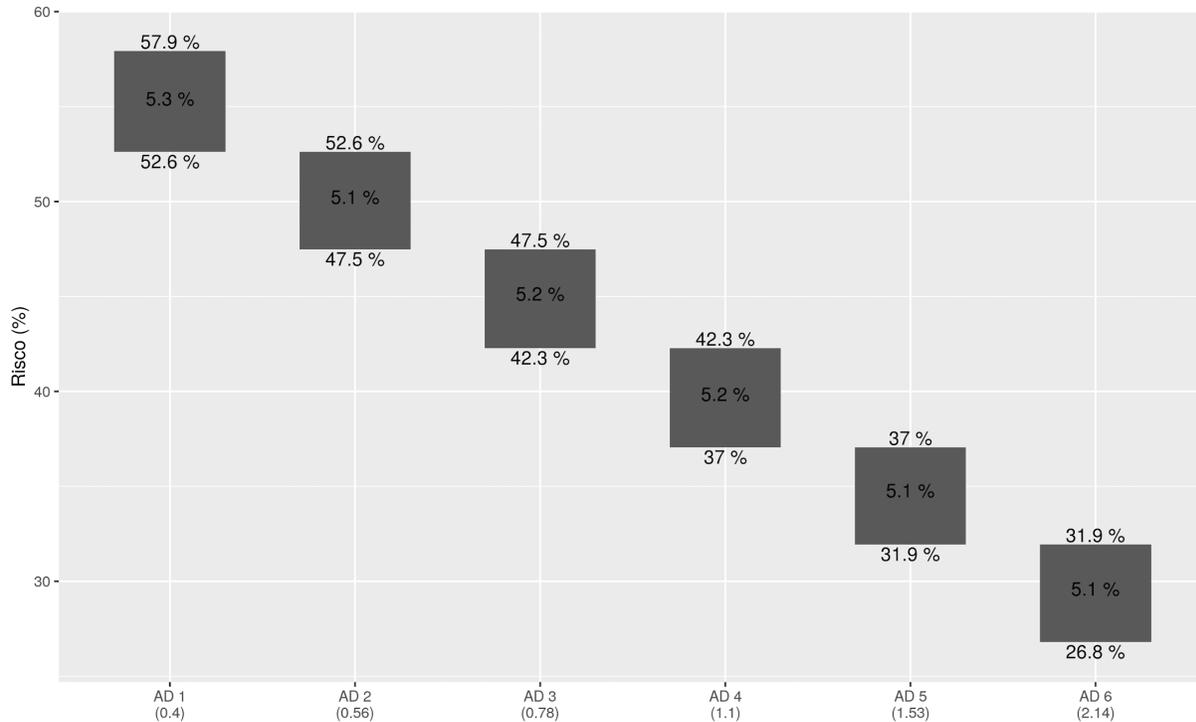


Figura 23. Histograma com valor mínimo, amplitude e valor máximo do risco correspondente às classes de AD 1 a AD 6 (intervalo de Água Disponível (AD) variável e intervalo de risco constante). Os valores entre parênteses no eixo x referem-se ao valor de referência de AD em mm cm⁻¹ de cada classe proposta.

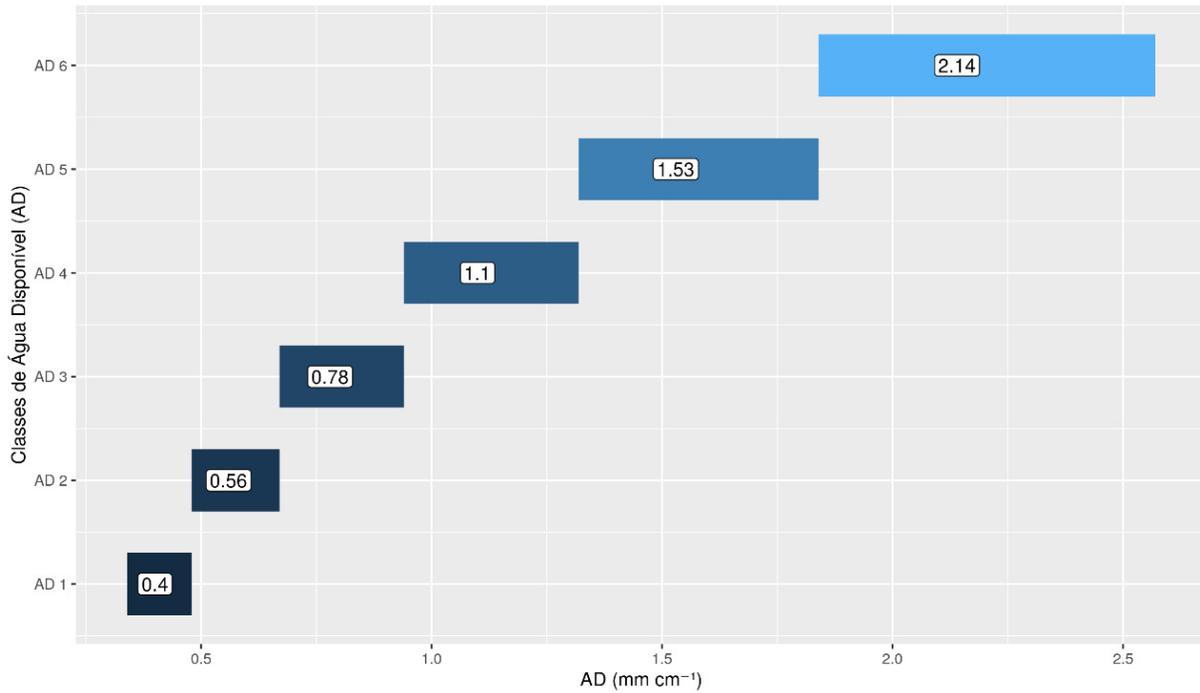


Figura 24. Gráfico de barras flutuantes mostrando a amplitude das seis faixas de AD, considerando variação constante do risco. Números em destaque em cada barra representam o valor de referência da classe, não necessariamente a média entre os valores mínimo e máximo.

Conclusões

A função de pedotransferência (PTF-ZARC) proposta para estimar a Água Disponível (AD) baseada nos teores de areia, silte e argila apresenta uma melhor acurácia quando comparada às PTFs similares disponíveis, e com as predições da regra atual utilizada para estimativa da AD nas modelagens do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC).

As seis faixas de AD propostas para as simulações do ZARC apresentam a mesma variação percentual do risco. O seu uso permitirá a obtenção de maior precisão nas estimativas de risco ao deficit hídrico e uma melhor representação dos diferentes solos em comparação as três faixas de AD atualmente em uso.

A AD no solo não é consequência apenas da sua composição granulométrica. Pode-se, potencialmente, obter maior precisão nas predições de AD utilizando mais parâmetros preditivos, tais como teores de carbono, de areia fina, da densidade de solo, valores medidos de retenção de água e ou variáveis categóricas (classes de solos, classes texturais). Estão sendo desenvolvidas AD-PTFs utilizando um maior número de variáveis preditivas, que serão inseridas em um sistema hierárquico destinado a obter predições mais acuradas da AD para os solos do Brasil.

Os resultados das simulações para os diferentes cultivos no ZARC têm âmbito nacional e qualquer mudança em sua operacionalização deverá ser precedida de estudos para avaliação dos impactos e validação dos novos procedimentos.

A seguir, são elencadas algumas recomendações para estudos do comportamento hídrico dos solos do Brasil:

- Há necessidade de ampliação do número de perfis modais nas diferentes classes de solos e regiões brasileiras com dados medidos das propriedades hidráulicas do solo, em especial os parâmetros referentes aos valores da umidade volumétrica na capacidade de campo (CC), no ponto de murcha permanente (PMP) e na saturação.
- Idealmente, os estudos sobre retenção de água nos solos deverão envolver a avaliação da umidade do solo desde a condição saturada até o solo seco no PMP (0 kPa até 1.500 kPa). Esses dados permitirão o ajuste das curvas de retenção de água (CRA). Por conseguinte, as CRA permitirão o uso de modelos de simulação de fluxos utilizando a solução da equação de Richard.

Para avaliar a composição granulométrica do solo, para fins predições de propriedades hidráulicas do solo, em diferentes classes de solo, o número de subamostras para compor uma amostra de solo composta, assim como as espessuras das camadas de solo a serem amostradas, deverá ser indicado em função da variabilidade inerente do solo, da acurácia necessária e das profundidades dos sistemas radiculares das diferentes espécies. As incertezas associadas aos dados granulométricos devidas à variabilidade dos solos, dos métodos de análises e dos diferentes esquemas amostrais serão temas abordados numa publicação futura.

Agradecimentos

Aos colegas que nos enviaram dados para a validação independente: Dr. Eduardo Guimarães Couto (UFMT, Cuiabá, MT), Dr. Jean Dalmo de Oliveira Marques (IFAM, Manaus, AM) e Joberta Cardoso Pastana Yakuwa (mestranda da UFRA, Belém, PA).

Aos colegas que participaram da reunião de apresentação destes resultados e colaboraram em diversas fases deste trabalho com sugestões, críticas e motivações: Dra. Marta Vasconcelos Ottoni (Serviço Geológico do Brasil – CPRM), Dr. Alessandro Samuel Rosa (Universidade Tecnológica do Paraná, Santa Helena, PR) e Dr. Everson da Conceição (Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ). Aos dois revisores anônimos e também ao Pesquisador e editor assistente do Comitê Local de Publicações da Embrapa Solos, Dr. Mauricio Rizzato Coelho, por valiosas sugestões para melhoria do trabalho.

Referências

ALMEIDA, J. A. Solos das pradarias mistas do sul do Brasil (Pampa Gaúcho). In: CURI, N.; KER J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. (ed.).

Pedologia: solos dos biomas brasileiros. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2017. p. 407-466.

ALVES, G. V. A.; MASUTTI, M. M.; OLIVEIRA, L. N. de. Caracterização da água disponível a partir de parâmetros físico-hídricos em solos de referência do sertão pernambucano. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NACIONAL DE EDUCAÇÃO E TECNOLOGIA, 4., 2009, Belém, PA. **Anais...** Belém, PA: Instituto Federal do Pará, 2009. 1 CD-ROM.

ANDRADE, F. H. N.; ALMEIDA, C. D. G. C. de; ALMEIDA, B. G. de; ALBUQUERQUE FILHO, J. A. C.; MANTOVANELLI, B. C.; ARAÚJO FILHO, J. C. de. Atributos físico-hídricos do solo via funções de pedotransferência em solos dos Tabuleiros Costeiros de Pernambuco. **IRRIGA**, v. 25, n. 1, p. 69-86, 2020.

ANJOS, L. H. C. dos; PEREIRA, M. G.; PEREZ, D. V.; RAMOS, D. P. Caracterização e classificação de Plintossolos no Município de Pinheiro - MA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1035-1044, 2007.

ARAÚJO FILHO, J. C.; BURGOS, N.; LOPES, O. F.; SILVA, F. H. B. B.; MEDEIROS, L. A. R.; MÉLO FILHO, H. F. R.; PARAHYBA, R. B. V.; CAVALCANTI, A. C.; OLIVEIRA NETO, M. B.; SILVA, F. B. R.; LEITE, A. P.; SANTOS, J. C. P.; SOUSA NETO, N. C.; SILVA, A. B.; LUZ, L. R. Q. P.; LIMA, P. C.; REIS, R. M. G.; BARROS, A. H. C. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco**. Recife: Embrapa Solos - UEP Recife; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa, 11).

ARAÚJO FILHO, J. C. de; SANTOS, J. C. P. dos; PARAHYBA, R. da B. V.; OLIVEIRA NETO, M. B. de; BARROS, A. H. C.; MARQUES, F. A.; AMARAL, A. J. do. **Zoneamento agroecológico do estado de Alagoas**: levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Alagoas. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2020. E-book. (Embrapa Solos. Documentos, 216).

ARRUDA, F. B.; ZULLO JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, J. B. de. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1987.

ASSAD, E. D.; MARIN, F. R.; PINTO, H. S.; ZULLO JÚNIOR, J. Zoneamento agrícola de riscos climáticos do Brasil: base teórica, pesquisa e desenvolvimento. **Informe Agropecuário**, v. 29, p. 47-60, 2008.

ASSAD, M. L. L.; SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 588-596, 2001.

ASSAD, M. L. L. **Funções de pedotransferência para estimativa da disponibilidade de água em diferentes tipos de solos do Brasil - Relatório Final**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2016. 18 p.

BARON, C.; PRESSEZ, P.; MARAUX, F. **Système d'Analyse Régionale des risques agroclimatiques - bilan hydrique appliqué au zonage** (SARRAZIN). Montpellier: CIRAD-CA, 1996. 26 p.

BARROS, A. H. C.; van LIER, Q. J. Pedotransfer functions for Brazilian soils. In: TEIXEIRA, W. G.; CEDDIA, M. B.; OTTONI, M. V.; DONAGEMMA, G. K. **Application of Soil Physics in Environmental Analyses**. 1. ed. Heidelberg: Springer, 2014. p. 131-162.

BARROS, A. H. C.; LIER, Q. J. V.; MAIA, A. H. M.; SCARPARE, V. F. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 379-391, 2013.

BARROS, A. H. C. **Desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em modelo agro hidrológico**. 2010. 149 f. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) - Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

BATJES, N. H.; RIBEIRO, E.; VAN OOSTRUM, A. Standardised soil profile data to support global mapping and modelling (WoSIS snapshot 2019). **Earth System Science Data**, v. 12, n. 1, p. 299-320, 2020.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: **Advances in soil science**. New York: Springer, 1989. p. 177-213.

BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations (with discussion). **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 26, p. 211-252, 1964.

BRASIL. **Decreto 9.404, de 19 de junho de 2018**. Institui o Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil - PronaSolos. 2018. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/D9414.htm. Acesso em: 30 jun. 2020.

BRASIL. **Decreto 10.269, de 6 de março de 2020**. Institui o Comitê Estratégico e o Comitê-Executivo do Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil. 2020. Disponível em: <http://www.in.gov.br/web/dou/-/decreto-n-10.269-de-6-de-marco-de-2020-246772845>. Acesso em: 30 jun. 2020.

BRASIL. Instrução Normativa n. 02, de 09 de outubro de 2008. Adota, no Zoneamento Agrícola de Risco Climático do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, as especificações para solos que menciona, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 10 out. 2008. Seção 1, n. 197, p. 71.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Seguro Rural**: Programa de subvenção ao prêmio do Seguro Rural protegendo o produtor rural Relatório das Indenizações Pagas entre 2006 a 2015. [Brasília: s. n., 2015]. Disponível em:

http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/seguro-rural/documentos-seguro-rural/RelatriodeSinistralidade_PSR_2006_2015.pdf. Acesso em: 25 ago. 2017.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, v. 25, p. 183-188, 1995.

CIRAD. **Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatologiques Version H (SARRA-H)**. Disponível em: https://sarra-h.teledetection.fr/SARRAH_BH.html. Acesso: 17 ago. 2020.

COELHO, E. F.; CONCEIÇÃO, M. A. F.; SOUZA, V. A. Estimativa dos limites de disponibilidade de água em função da densidade global e da textura do solo. **Revista Ceres**, v. 45, n. 258, p. 183-192, 2015.

COELHO, M. R.; FIDALGO, E. C. C.; ARAÚJO, F. de O.; SANTOS, H. G. dos; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; PEREZ, D. V.; MOREIRA, F. M. de S. **Solos das áreas-piloto do Projeto BiosBrasil (Conservation and Sustainable Management of Below-Ground Biodiversity: phase I)**, Município de Benjamin Constant, Estado do Amazonas. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 67).

CORRÊA, J. C. Características físico-hídricas dos solos Latossolo Amarelo, Podzólico Vermelho Amarelo e Podzol Hidromórfico do Estado do Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, p. 347-360, 1984.

CUNHA, G. R.; ASSAD, E. D. Uma visão geral do número especial da RBA sobre o zoneamento agrícola no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 377-385, 2001.

DRAPER N. R.; PUKELSHEIM F. K. Ordering of simplex designs for first-and second-degree mixture models. **Journal of statistical planning and inference**. v. 1, n. 2, 79 p. 325-348, 1999.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3. ed. New York: John Wiley and Sons, 1998. 706 p.

DINGKUHN, M.; BARON, C.; BONNAL, V.; MARAUX, F.; SARR, B.; CLOPES, A. FOREST, F. Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. In: TJARK, S. B.; WOPEREIS, M. (ed.). **Decision support tools for smallholder agriculture in Sub-Saharan Africa: a practical guide..** Muscle Shoals: IFDC, p. 127-139. 2003.

EAGLEMAN, A. M. An experimentally derived model for actual evapotranspiration. **Agricultural Meteorology**, v. 8, n. 4/5, p. 385-409, 1971.

EMBRAPA. **Sistema de Informação de Solos Brasileiros – BDSOLOS**. [2014]. Disponível em: <http://www.sisolos.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 22 dez. 2020.

FARIAS, J. R. B.; ASSAD, E. D.; ALMEIDA, I. D.; EVANGELISTA, B. A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas

regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 415- 421, 2001.

RODRIGUES, T. E.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. C. de; SILVA, J. M. L. da; VALENTE, M. A.; CAPECHE, C. L. **Caracterização físico-hídrica dos principais solos da Amazônia Legal. I. Estado do Pará: relatório técnico**. Belém, PA: EMBRAPA-SNLCS: FAO, 1991. 236 p.

FOREST, F. **Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales**. Présentation et utilisation du logiciel BIP. Montpellier: IRAT-CIRAD, 1984. 63 p.

GAISER, T.; GRAEF, F.; CORDEIRO, J. C. Water retention characteristics of soils with contrasting clay mineral composition in semi-arid tropical regions. **Australian Journal of Soil Research**, n. 38, p. 523–536, 2000.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 885–893, 2002.

GONÇALVES, S. L.; FARIAS, J. R. B. de; SIBALDELLI, R. N. R. **Eventos climáticos adversos e seus impactos para as culturas de soja, milho e trigo no Brasil**: Documentos. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2019. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/207382/1/Doc-420-OL-final.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2020.

GRUNDY, M. J.; ROSSEL, R. V.; SEARLE, R. D.; WILSON, P. L.; CHEN, C.; GREGORY, L. J. Soil and landscape grid of Australia. **Soil Research**, v. 53, n.8, p. 835-844, 2015.

HADDAD, D. B.; ASSIS, L. S. de; TARRATACA, L.; GOMES, A. D. S.; CEDDIA, M. B.; OLIVEIRA, R. F. D. N. Brazilian soil bulk density prediction based on a committee of neural regressors. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 2018, Rio de Janeiro. **Papers...** Rio de Janeiro: IEEE, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/jiel7/8465565/8488986/08489177.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2021.

IBGE. **Mapa de Solos**. Rio de Janeiro, 2018. Escala 1: 250.000. IBGE. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>. Acesso em: 7 ago. 2020.

INSTITUTO DO AÇÚCAR E DO ÁLCOOL. **Projeto de irrigação e drenagem da cana-de-açúcar na região Norte Fluminense**: estudos e levantamentos pedológicos: relatório técnico setorial. Rio de Janeiro: Sondotécnica Engenharia de Solos, 1983. 9 v.

ISRIC. **World Soil Information Service**. Wageningen. Disponível em: <https://www.isric.org/explore/wosis> . Acesso em: 3 nov. 2020.

KOTLAR, A. M.; VAN LIER, Q. de J.; SOUZA BRITO, E. de. Pedotransfer functions for water contents at specific pressure heads of silty soils from Amazon rainforest. **Geoderma**, v. 361, p. 114098, 2020.

LEENHARDT, D. **Spatialisation du bilan hydrique**: propagation des erreurs d'estimation des caractéristiques du sol au travers des modèles de bilan hydrique. Cas du blé dur d'hiver. 1991. 123 f. Thèse (Thèse de Doctorat en Sciences biologiques et Fondamentales Appliquées) – École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Montpellier.

LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; IWATA, S. A.; SOUZA, K. W. de; MACEDO, R. S.; GUIMARÃES, S. T. Atributos químicos e composição granulométrica de solos na área de estudo do Piatam. In: CAVALCANTE, K. V.; RIVAS, A. A. F.; FREITAS, C. E. de C. (ed.). **Indicadores socioambientais e atributos de referência para o trecho Urucu-Coari-Manaus, rio Solimões, Amazônia Ocidental**. 1. ed. Manaus: UFAM, 2007. p. 131-137.

LUMBRERAS, J. F. **Regime hídrico do solo sob cobertura de floresta e de eucalipto na pré-amazônia maranhense**. 1996. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LUMBRERAS, J. F. **Relações solo-paisagem no noroeste do estado do Rio de Janeiro: subsídios ao planejamento de uso sustentável em áreas de relevo acidentado do bioma Mata Atlântica**. 2008. 305 f. Tese (Doutorado em Planejamento e Gestão Ambiental) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LUMBRERAS, J. F.; CARVALHO FILHO, A. de; MOTTA, P. E. F. da; BARROS, A. H. C.; AGLIO, M. L. D.; DART, R. de O.; SILVEIRA, H. L. F. da; QUARTAROLI, C. F.; ALMEIDA, R. E. M. de; FREITAS, P. L. de. **Aptidão agrícola das terras do Matopiba**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2015. 48 p. il. color. (Embrapa Solos. Documentos, 179).

MACEDO, R. S.; TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C.; RODRIGUES, M. do R. L. Caracterização química e física da camada superficial do solo em clareiras com diferentes idades de revegetação na Província Petrolífera de Urucu, Coari-AM. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 17., 2008, Rio de Janeiro. **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Embrapa Solos: Embrapa Agrobiologia, 2008. 1 CD-ROM. p. 1-5. (Embrapa Solos. Documentos, 101).

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomias**. Coleção 5 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil, 2020. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acessado 26 out. 2020.

MARQUES, J. de O.; LIBARDI, P. L.; TEIXEIRA, W. G. Estudo de parâmetros físicos, químicos e hídricos de um Latossolo Amarelo, na região Amazônica. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 2, p. 145–154, 2004.

MCBRATNEY, A. B, MINASNY, B.; CATTLE, S. R.; VERVOOT, R. W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, v. 109, p. 41-73. 2002.

MEDRADO, E.; LIMA J. E. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna. **Geoderma Regional**, v. 1, p. 59-66, 2014.

MELLO, C. R.; OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, D. F.; LIMA, J. M.; LOPES, D. Modelos para determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten para um Cambissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 9, n. 1, p. 23-29, 2005.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B. D.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 40, n. 4, p. 848-853, 2010.

MINASNY B.; HARTEMINK A. E. Predicting soil properties in the tropics. **Earth-Science Reviews** v. 106, p. 52–62, 2011.

NAKAI, A. M.; MACIEL, R. J. S.; MONTEIRO, J. E. B. de A.; OLIVEIRA, A. F. de; CUADRA, S. V. **Micura**. Versão 1. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2018.

NASCIMENTO, D. V. do. **Funções de pedotransferência para estimar a umidade em solos cultivados com cana-de-açúcar na zona da Mata de Pernambuco**. 2015. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco – Recife.

NASCIMENTO, G. B.; ANJOS L. H. C. dos; PEREIRA, M. G.; FONTANA, A.; SANTOS, H. G. dos. Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 4, p. 560-569, 2010.

OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES J. J. V.; MARQUES, F. A. Funções de pedotransferência para predição de umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 315-323, 2002.

OTTONI, M. V.; OTTONI FILHO, T. B.; SCHAAP, M. G.; LOPES-ASSAD, M. L. R.; ROTUNNO FILHO, O. C. Hydrophysical database for Brazilian soils (HYBRAS) and pedotransfer functions for water retention. **Vadose Zone Journal**, v. 17, n. 1, p. 1-17, 2018.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Development of pedotransfer functions in soil hydrology. **Development in Soil Science**, v. 30, 542 p., 2004.

PERAZA, J. E. S. **Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul**. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

POLIDORO, J. C.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; CARVALHO FILHO, A. de; MOTTA, P. E. F. da; CARVALHO JÚNIOR, W. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; CURCIO, G. R.; CORREIA, J. R.; MARTINS, E. de S.; SPERA, S. T.; OLIVEIRA, S. R. de M.; BOLFE, E. L.; MANZATTO, C. V.; TOSTO, S. G.; VENTURIERI, A.; SA, I. B.; OLIVEIRA, V. A. de; SHINZATO, E.; ANJOS, L. H. C. dos; VALLADARES, G. S.; RIBEIRO, J. L.; MEDEIROS, P. S. C. de; MOREIRA, F. M. de S.; SILVA, L. S. L.; SEQUINATTO, L.; AGLIO, M. L. D.; DART, R. de O. **Programa Nacional de Solos do Brasil** (PronaSolos). Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2016. 53 p. (Embrapa Solos. Documentos, 183). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de->

publicacoes/-/publicacao/1054924/programa-nacional-de-solos-do-brasil-pronasolos. Acesso em: 25 jun. 2020.

THE R FOUNDATION. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, 2018. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 10 jan. 2019.

RAWLS, W. J.; GISH, T. J.; BRAKENSIEK, D. L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advances in Agronomy**, v. 16, p. 213-234, 1991.

REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; URACH, F. L.; CARLESSO, R. Estimation of water retention under availability in soils of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1547-1560, 2009.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Manole, 2004. 478 p.

RODRIGUES, L. N.; MAIA, A. H. N.; SILVA R. N. da. Funções de pedotransferência para estimar capacidade de campo, ponto de murcha permanente e densidade global em solos de uma bacia hidrográfica do bioma cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 40., 2011, Cuiabá. **Geração de tecnologias inovadoras e o desenvolvimento do Cerrado brasileiro: artigos completos**. Cuiabá: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2011. 1 CD-ROM.

ROSSATO, L. **Estimativa da Capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil**. 2002. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

SAMUEL-ROSA, A.; DALMOLIN, R. S. D.; BUENO, J. M. M.; TEIXEIRA, W. G.; ALBA, J. M. F. Open legacy soil survey data in Brazil: geospatial data quality and how to improve. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 1, e20170430 p. 2020.

SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D.; GUIMARÃES, D. P. I. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura de milho na Região Centro-Oeste do Brasil e para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 527-535, 2001.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBREERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, W. G.; MARTINS, J. I. F. O Zoneamento Agrícola de Risco Climático e sua contribuição à agricultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 73-94, 2016.

SANTOS, W. J. R. D.; CURI, N.; SILVA, S. H. G.; ARAÚJO, E. F. D.; MARQUES, J. J. Pedotransfer functions for water retention in different soil classes from the center-southern Rio Grande do Sul State. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, n. 1, p. 49-60, 2013.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; van GENUCHTEN, M. T. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology**, v. 251, n. 3-4, p.163-176, 2001.

SCHAEFER, C. R. G. R.; LIMA, H. N. de; TEIXEIRA, W. G.; VALE JÚNIOR, J. F. do; SOUZA, K. W. de; CORRÊIA, G. R.; MENDONÇA, B. A. F.; AMARAL, E. F.; CAMPOS, M. C. C.; RUIVO, M. de L. P. Solos da região Amazônica. In: CURI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. R. G. R. (ed.). **Pedologia: solos dos biomas brasileiros**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v. VIII, p. 111-176. 2017.

SHINZATO, E.; TEIXEIRA, W. G.; DANTAS, M. E. Principais classes de solos do Estado do Acre. In: Adamy, A. (ed.). **Geodiversidade do estado do Acre**. Porto Velho: CPRM, 2015. p. 57-74.

SILVA A. S.; BRITO, L. T.; OLIVEIRA, C. A.; MOTA, A. W. Parâmetros de solo em função da umidade na capacidade de campo em áreas irrigáveis do trópico semiárido Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 25, n. 1, p. 103-116, 1990.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Natural Resources Conservation Service. Web Soil Survey. **The simple yet powerful way to access and use soil data**. Disponível em: <http://websoilsurvey.sc.egov.usda.gov/>. Acesso em: 3 nov. 2020.

SOIL AND LANDSCAPE GRID OF AUSTRALIA. **Terrestrial Ecosystem Research Network - CSIRO**. Disponível em: <https://www.clw.csiro.au/aclep/soilandlandscapegrid/>. Acesso em: 3 nov. 2020.

SOUZA, E. D.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BATJES, N. H.; SANTOS, G. R. D. PONTES, L. M. Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. **Scientia Agricola**. v. 73(6), p. 525-534. 2016.

STEINMETZ, S.; SILVA, S. C da. **Início dos estudos sobre zoneamento agrícola de risco climático (ZARC) no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2017. 27 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 312).

TEIXEIRA, W. G.; ARRUDA, W. DA C.; SHINZATO, E.; MACEDO, R. S.; MARTINS, G. C.; LIMA, H. N.; RODRIGUES, T. E. Solos do Amazonas. In: MAIA, M. A. M.; MARMOS, J. L. (ed.). **Geodiversidade do estado do Amazonas**. Manaus - Rio de Janeiro: CPRM, p. 71-86. 2010.

TEIXEIRA, W. G.; LIMA, H. N.; PINTO, W. H. A.; SOUZA, K. W. de; SHINZATO, E.; SCHROTH, G. O manejo dos solos nas várzeas da Amazônia. In: BERTOL, I; MARIA, I. C. de; SOUZA, L. da S. (ed.). **Manejo e conservação do solo e da água**. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019a. v. 1, p. 701-728.

TEIXEIRA, W. G.; LUMBRERAS, J. F.; MARTINS, G. C.; NOGUEIRA, J. do N. P.; LIMA, M. M. da G. de; COELHO, M. R. Retenção de água em amostras de solos de Rondônia. In: LUMBRERAS, J. F.; SILVA, L. M. da; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; WADT, P. G. S.; PEREIRA, M. G.; DELARME LINDA-HONORÉ, E. A.; BURITY, K. T. L. (ed.). **Guia de**

campo da XII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Rondônia. Brasília: Embrapa, 2019b. c. 12. E-book.

TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F. Retenção de água em amostras de solos de Roraima. In: BATISTA, K. D.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, V. A. de; VALE JÚNIOR, J. F. do (ed.). **Guia de campo da XI Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Roraima.** Brasília: Embrapa, 2018. c. 6. E-book.

TEIXEIRA, W. G. **Land use effects on soil physical and hydraulic properties of a clayey ferralsol in the Central Amazon.** 2001. 268 p. Tese (Doutorado) - Universidade Bayreuth, Bayreuth.

TOMASELLA, J.; HODNETT M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, v. 163, p. 190-202, 1998.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y.; CRESTANA, S.; RAWLS, W. J. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, p. 1085-1092, 2003.

URACH, F. L. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação.** 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Santa Maria, Santa Maria.

BERG, M. van den; KLAMT, E.; van REEUWIJK, L. P.; SOMBROEK, W. G. et al. Pedotransfer Functions for the Estimation of Moisture Retention Characteristics of Ferralsols and Related Soils. **Geoderma**, v. 78, n. 3-4, p. 161-180, 1997.

LIER, Q. J. van. Índices da disponibilidade de água para as plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 95-106.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. **Soil Science**, v. 68, p.75-94, 1949.

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. **Modern Applied Statistics with S.** 4th ed. New York: Springer, 2002.

VERECKEN, H; JAVAUX, M.; WEYNANTS, M.; PACHEPSKY, Y.; SCHAAP, M. G.; van GENUCHTEN, T. M. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten-Mualem soil hydraulic properties: A review. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 4, p. 795-820, 2010.

WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 123-150, 2001.

ZHANG, Y.; SCHAAP, M. G. Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). **Journal of Hydrology**, v. 547, p. 39-53, 2017.

Apêndices – Análises estatísticas

AD-PTF, Modelo 1 (m1)

$$AD = a_1AT + a_2SIL + a_3ARG + a_4(AT * SIL) + a_5(AT * ARG) + a_6(SIL * ARG) + a_7(AT * SIL * ARG)$$

Em que:

AD é a água disponível ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

a_{1-7} são os coeficientes apresentados na Tabela 1a;

AT , SIL e ARG são os teores de areia total, silte e argila, em porcentagem, respectivamente.

Tabela 1a. Coeficientes, erro padrão e significância (teste t) do ajuste da PTF de predição de AD sem transformação (m1).

Coeficientes	Estimativa	Erro Padrão	valor t	Pr(> t)
AT	3.834e-05	5.899e-05	0.650	0.515909
SIL	2.979e-03	1.929e-04	15.439	< 2e-16 ***
ARG	3.244e-04	1.071e-04	3.030	0.002505 **
(AT * SIL)	8.100e-06	6.592e-06	1.229	0.219436
(AT * ARG)	3.732e-05	4.110e-06	9.081	< 2e-16 ***
(SIL * ARG)	2.074e-06	6.928e-06	0.299	0.764683
(AT * SIL * ARG)	-1.021e-06	2.888e-07	-3.536	0.000424 ***

Probabilidade de significância - códigos 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.03603 on 1014 Graus de liberdade (GL)

Multiple R-squared: 0.9213, Adjusted R-squared: 0.9207

F-estatística: 1696 on 7 and 1014 GL, p-valor: < 2.2e-16

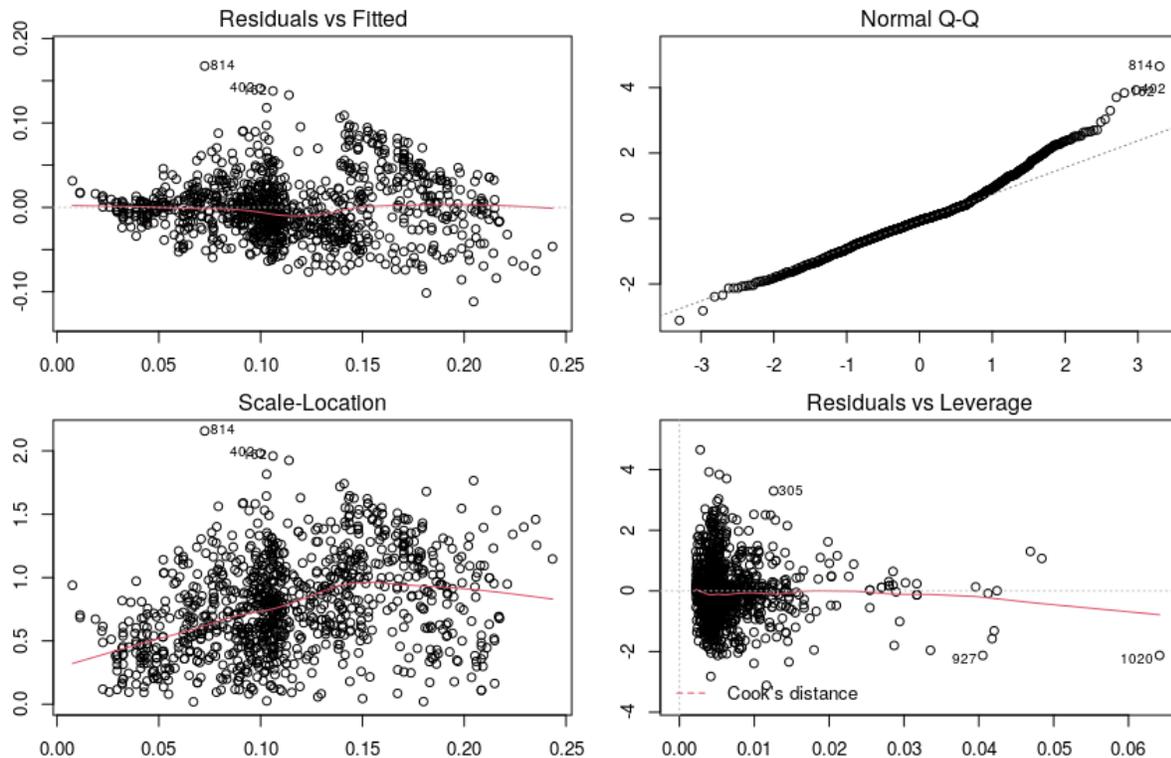


Figura 1a. a) Gráfico de dispersão de resíduos versus valores preditos de AD; b) Gráficos Quantil-Quantil (Q-Q); c) Gráfico de dispersão da raiz quadrada do valor absoluto do resíduo padronizado *versus* os valores preditos. Gráfico de dispersão do resíduo padronizado *versus leverage* com a distância de Cook; d) Gráfico de dispersão da distância de Cook *versus leverage* para o modelo PTF AD m1 (dados sem transformação).

PTF Água Disponível, Modelo 2 (m2)

Utiliza transformação Box-Cox para melhorar distribuição dos resíduos.

$$AD_t = a_1 AT + a_2 SIL + a_3 ARG + a_4(AT * SIL) + a_5(AT * ARG) + a_6(SIL * ARG) + a_7(AT * SIL * ARG)$$

$$AD = (\lambda * AD_t + 1)^{(1 / \lambda)}$$

Em que:

AD é a água disponível ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

AD_t é a água disponível antes da transformação Box-Cox (sem unidade);

a_1-7 são os coeficientes apresentados na Tabela 2a;

AT , SIL e ARG são os teores de areia total, silte e argila (%), respectivamente;

$lambda$ é o fator de transformação Box-Cox ($lambda = 0,3591$)

Cálculo do $lambda$ para transformação Box-Cox.

$lambda = 0,3591$

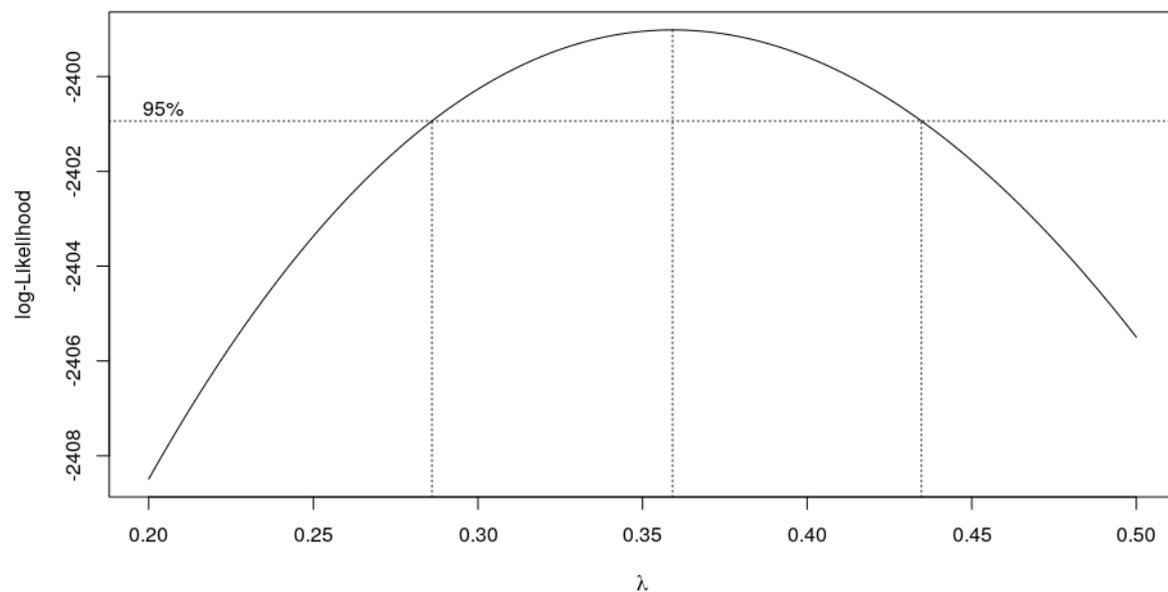


Figura 2a. Determinação gráfica do fator $lambda$ utilizado na transformação dos dados de AD observados para AD_t . O valor de $lambda$ é ponto de máximo deste gráfico, que assumem o valor de 0,3591.

Tabela 2a. Coeficientes, erro padrão e significância (teste t) do ajuste da PTF de predição de ADt com transformação (m2).

Coeficientes	Estimativa	Erro padrão	valor t	Pr(> t)
AT	-2,129E+02	2,343E-04	-90.865	< 2e-16 ***
SIL	-1,006E+02	7,663E-04	-13.126	5.08e-13 ***
ARG	-1,902E+02	4,252E-04	-44.726	8.15e-15 ***
(AT * SIL)	1,171E-04	2,618E-05	4.473	8.57e-06 ***
(AT * ARG)	2,074E-04	1,633E-05	12.704	< 2e-16 ***
(SIL * ARG)	6,119E-05	2,751E-05	2.224	0.0264 *
(AT * SIL * ARG)	-6,374E-06	1,147E-06	-5.556	3.52e-08 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1431 on 1014 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9917, Adjusted R-squared: 0.9917

F-statistic: 1.735e+04 on 7 and 1014 DF, p-value: < 2.2e-16

Obs: o *residual standard error* nesta tabela está na escala da AD transformada (ADt). O RMSE para o modelo M2, calculado via validação cruzada e na escala destransformada foi de 0,0366 cm³ cm⁻³ (0,366 mm cm⁻¹), similar ao obtido para M1 via validação cruzada (0,362 mm cm⁻¹).

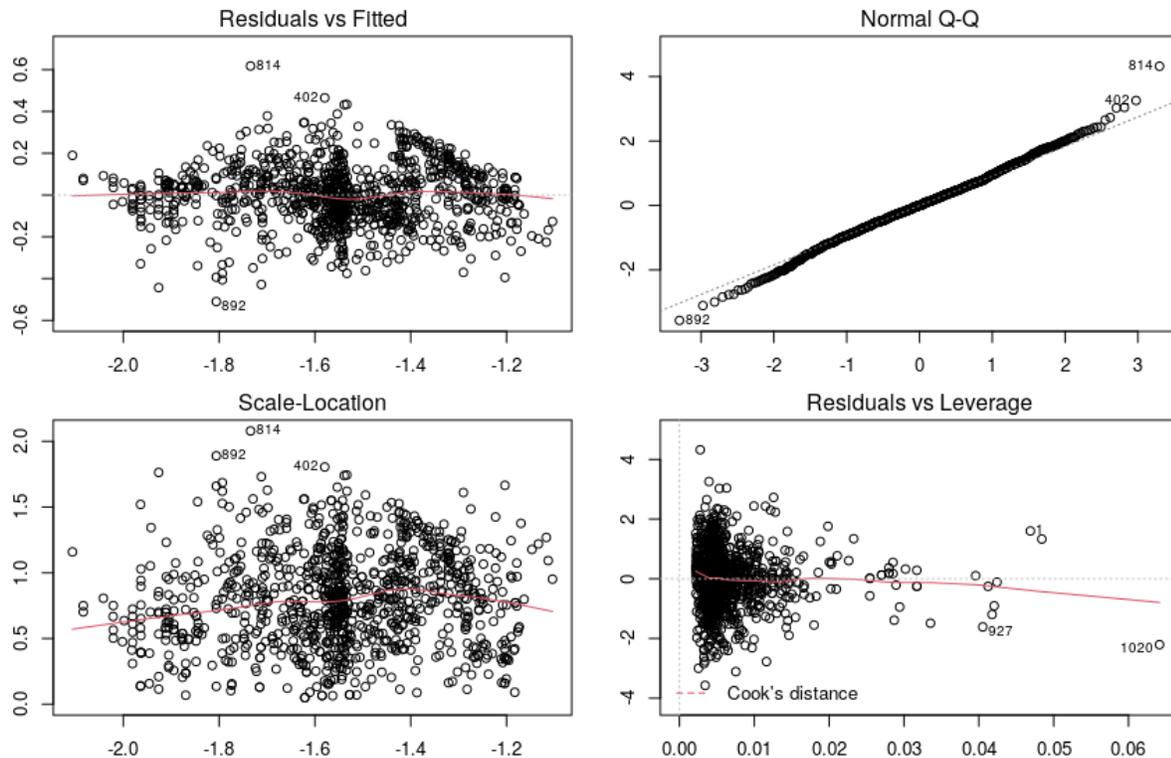


Figura 3a. a) Gráfico da dispersão de resíduos *versus* valores preditos de AD; b) Gráficos Quantil-Quantil (Q-Q); c) Gráfico de dispersão da raiz quadrada do valor absoluto do resíduo padronizado *versus* os valores preditos; d) Gráfico de dispersão do resíduo padronizado *versus* leverage com a distância de Cook. Gráfico de dispersão da distância de Cook *versus* leverage para o modelo PTF AD m2 (dados com transformação).

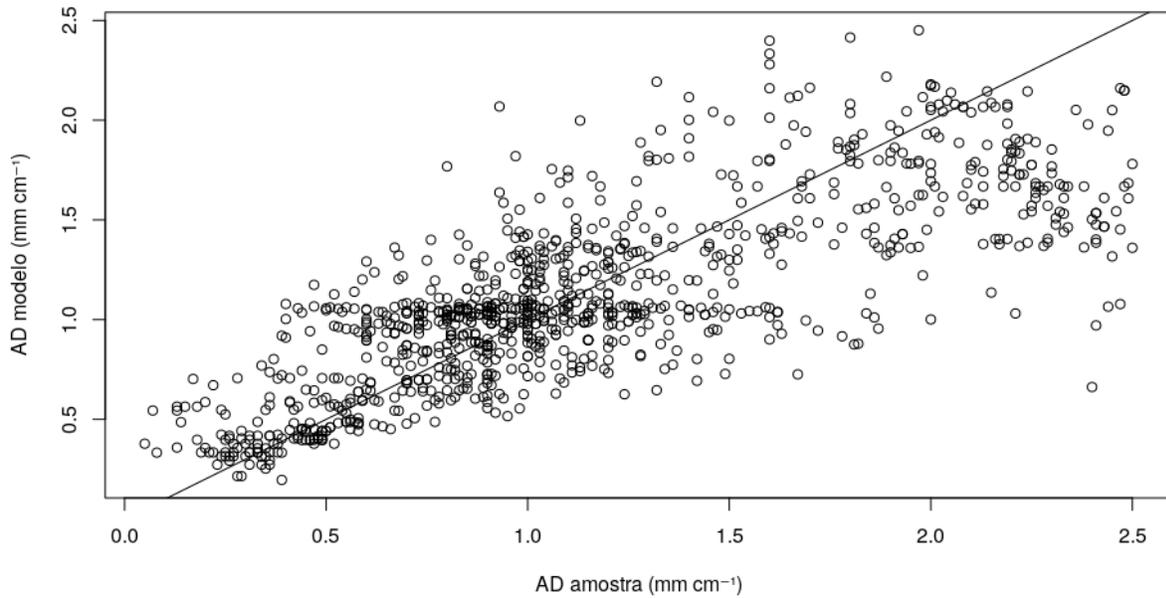


Figura 4a. Gráfico de dispersão 1:1 dos dados de AD medidos (observados) *versus* AD preditos pelo modelo M2. O coeficiente de correlação é 0,78.

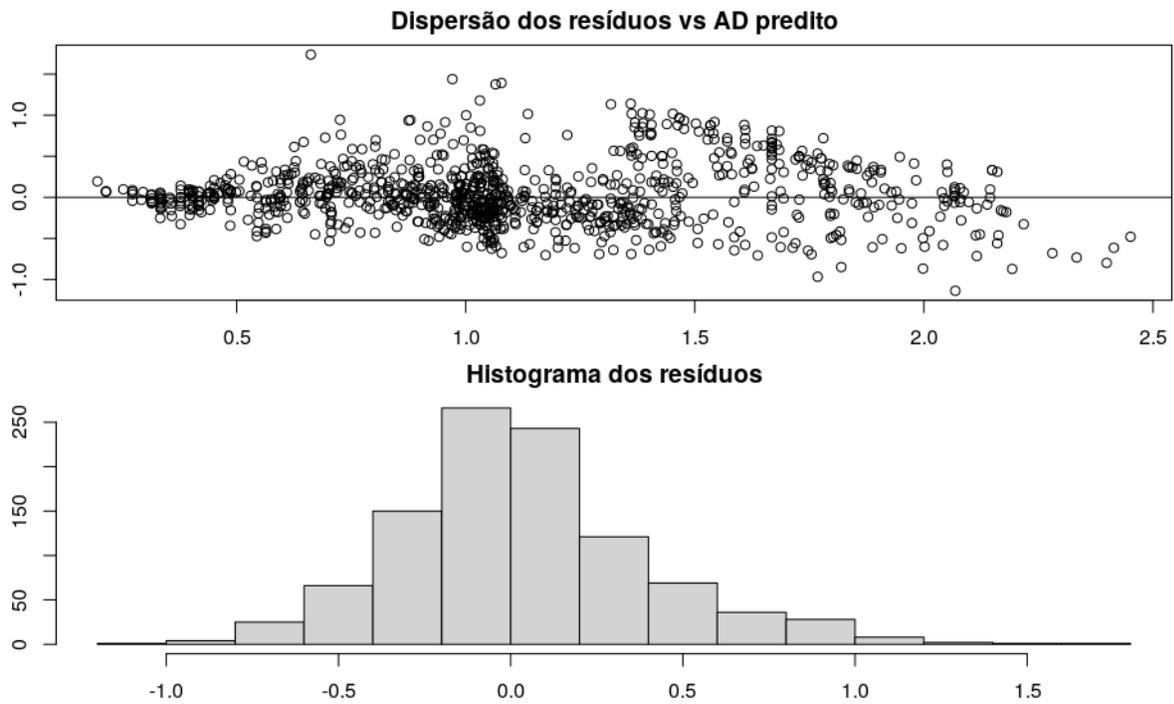


Figura 5a. Gráfico de dispersão e histograma dos resíduos do PTF-AD (m2).

Intervalo de confiança da AD estimada (M2)

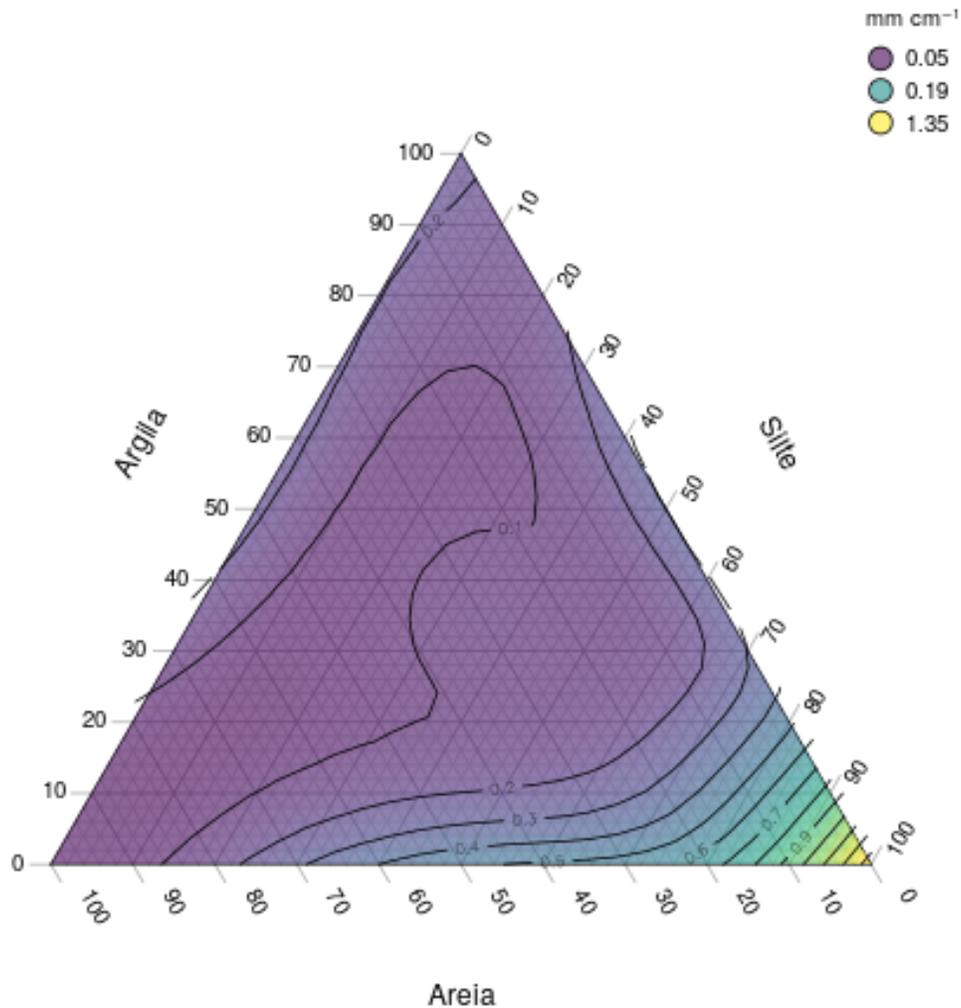


Figura 6a. Gráfico ternário com os valores do intervalo de confiança (95%) da estimativa de AD pelo modelo PTF-.

No link a seguir, podem ser acessados todos os valores de água disponível (ADs) estimados em função da sua composição granulométrica (média e intervalos de confiança com o limite inferior e superior da AD num intervalo de confiança de 95%): https://github.com/dvictori/ptf_zarc/blob/master/resultados/Pre_ditos_triangulo_AD_m2.csv