



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

SAMUEL CASTRO PRADO

ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NO DESEMPENHO DE
COBERTURAS SECAS SUBMETIDAS A CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO
NORDESTE BRASILEIRO

FORTALEZA

2021

SAMUEL CASTRO PRADO

ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NO DESEMPENHO DE
COBERTURAS SECAS SUBMETIDAS A CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO
NORDESTE BRASILEIRO

Dissertação apresentado ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Instrumentos de Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar

Coorientadora: Profa. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos

FORTALEZA

2021

P896a Prado, Samuel Castro.
Análise Numérica da Influência da Vegetação no Desempenho de Coberturas Secas Submetidas a Condições Climáticas do Nordeste Brasileiro / Samuel Castro Prado. - 2021.
143 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar.
Coorientação: Profa. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos.

1. Coberturas secas. 2. Vegetação. 3. Aterros sanitários. 4. Modelagem numérica. I. Título.

CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 , - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

AVALIAÇÃO

Processo: 23256.005918/2021-81

Interessado: Marcos Fabio Porto de Aguiar

FOLHA DE APROVAÇÃO

SAMUEL CASTRO PRADO

ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NO DESEMPENHO DE COBERTURAS SECAS SUBMETIDAS A CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO NORDESTE BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 14/07/2021



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Fabio Porto de Aguiar, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 15/07/2021, às 14:14, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Anderson Borghetti Soares, Usuário Externo**, em 16/07/2021, às 12:16, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Teresa Raquel Lima Farias, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 16/07/2021, às 16:01, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Juceline Batista dos Santos Bastos, Professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 16/07/2021, às 20:38, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **2806526** e o código CRC **1CE3381C**.

A Deus.

À minha mãe Lucia.

A Betoween.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida e saúde que concede a mim e a minha mãe e pelo futuro que nos reserva.

Agradeço à minha mãe, Lucia, pelo amor incondicional, dedicação, suporte emocional e sacrifícios que fez e faz por mim durante toda a vida, sem os quais não seria ninguém, representando a única certeza da minha vida e o motivo de ainda estar aqui.

Agradeço ao Bethowen, pela amizade e pelo carinho por tanto tempo compartilhado.

Agradeço ao professor Marcos Porto pelas orientações que se estendem desde a graduação, pela oportunidade de participar do Grupo de Pesquisa em Geotecnia (GPGE0), pelo compartilhamento de conhecimento e de oportunidades, pela paciência em relação aos percalços do caminho. Lembrarei com gratidão sua contribuição em minha jornada acadêmica.

Agradeço à professora Juceline pelas orientações, pelas correções pontuais e objetivas, pelo trato empático e paciência em suas abordagens, que fizeram a diferença no percurso deste trabalho.

Agradeço ao professor Anderson Borghetti pelas valiosas contribuições teóricas feitas a este trabalho, por ter cedido o *software* utilizado e pela altruísta disponibilidade de tempo para reunir-se comigo e esclarecer inúmeras dúvidas.

Agradeço à professora Teresa por suas contribuições ao trabalho e pelos ensinamentos nas disciplinas de graduação em Engenharia Civil, em especial pelos elogios e incentivos que tornaram momentos difíceis da época menos desgastantes.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (*campus* Fortaleza) e ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental (PPGTGA) pela excelente estrutura fornecida e pelo trabalho eficiente de seus colaboradores.

Agradeço à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio à realização desta pesquisa.

“Não vos inquieteis, pois, pelo dia de amanhã, porque o dia de amanhã cuidará de si mesmo. Basta a cada dia o seu mal” (MATEUS, 6:34).

RESUMO

Coberturas secas são estruturas utilizadas para revestir as camadas de resíduos sólidos dispostos em aterros e tem como função limitar os fluxos de fluidos para o interior e exterior da massa de resíduos, reduzindo a produção e proliferação de elementos danosos ao meio ambiente, resultantes dos processos físico-químicos envolvidos na degradação dos resíduos contidos. A vegetação é um fator importante, uma vez que interfere na troca de fluidos entre a camada de cobertura e a atmosfera pelo processo de evapotranspiração, tem potencial de interceptação das chuvas pelas folhas e de redução do líquido percolado no sistema de cobertura. Verifica-se, entretanto, que os estudos concentram esforços em regiões de clima árido ou semiárido ou úmidos. É necessário, portanto, um estudo mais aprofundado sobre o papel da vegetação no desempenho de coberturas secas situadas em regiões como a do município de Fortaleza, região litorânea que apresenta conjugação de clima subúmido úmido e influências de semiárido, com períodos definidos de estiagem e chuvoso, uma vez que a área da superfície vegetada na superfície do solo dependerá do período do ano. Diante disso, o objetivo deste trabalho é analisar o desempenho da saturação e do balanço hídrico de três sistemas de coberturas secas sob condições climáticas do município de Fortaleza, através de modelagens numéricas auxiliadas pelo *software* VADOSE/W (GEOSTUDIO, 2007). Foram adotadas, para tanto, três condições de precipitação (máxima, média e mínima) dos últimos 20 anos e quatro condições de vegetação (sem vegetação, IAF ruim, IAF bom e IAF excelente). Identificou-se que o perfil de cobertura A, constituído por uma camada de areia argilosa (similar à configuração do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia), não apresentou valores de saturação que permitissem o eficaz controle da entrada de oxigênio na camada de cobertura, enquanto o perfil B (constituído de uma camada de solo superficial – *Top soil* – e uma camada de argila) e o perfil C (composto por uma camada de *Top soil*, uma camada de solo granular e uma camada de argila) apresentaram esse controle em parte do ano. O aumento do IAF implicou alterações no balanço hídrico, promovendo a redução na evaporação do solo, aumento da transpiração e redução da percolação, auxiliando, assim, na mitigação da contaminação do solo subjacente e das águas subterrâneas e superficiais pelo líquido percolado, além de diminuir às solicitações sobre os sistemas de tratamento de lixiviado.

Palavras-chave: Coberturas secas. Vegetação. Aterros sanitários. Modelagem numérica.

ABSTRACT

Dry covers are structures used to cover the layers of solid waste disposed in landfills and their function is to limit the flow of fluids to the interior and exterior of the waste mass, reducing the production and proliferation of elements harmful to the environment, resulting from physical processes -chemicals involved in the degradation of the waste contained. Vegetation is an important factor, as it interferes with the exchange of fluids between the cover layer and the atmosphere through the evapotranspiration process, has the potential to intercept rain by leaves and reduce the liquid percolated in the cover system. It appears, however, that the studies concentrate efforts in regions with arid or semi-arid or humid climates. Therefore, a more in-depth study is needed on the role of vegetation in the performance of dry covers located in regions such as the municipality of Fortaleza, which presents a combination of sub-humid climate and semi-arid influences, with defined periods of dry and rainy, as the area of vegetated surface on the soil surface will depend on the period of the year. Therefore, the objective of this work is to analyze the performance of saturation and water balance of three dry cover systems under climatic conditions in the city of Fortaleza, through numerical modeling aided by the VADOSE/W software (GEOSTUDIO, 2007). For this purpose, three rainfall conditions (maximum, medium and minimum) of the last 20 years and four vegetation conditions (no vegetation, bad LAI, good LAI and excellent LAI) were adopted. It was identified that the cover profile A, consisting of a clayey sand layer (similar to the configuration of the Municipal Sanitary Landfill West of Caucaia), did not present saturation values that would allow the effective control of oxygen inflow into the cover layer, while profile B (consisting of a layer of top soil – Top soil – and a layer of clay) and profile C (composed of a layer of Top soil, a layer of granular soil and a layer of clay) showed this control in part of the year. The increase in the LAI implied changes in the water balance, promoting a reduction in soil evaporation, an increase in transpiration and a reduction in percolation, thus helping to mitigate the contamination of the underlying soil and ground and surface water by the percolated liquid, in addition to decreasing requests about leachate treatment systems.

Keywords: Dry covers. Vegetation. Landfills. Numerical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Representação das fases de um solo não saturado.....	20
Figura 2 — Curvas características típicas de areias, siltes e argilas.....	23
Figura 3 — Exemplo do fenômeno da histerese em curva de retenção de água de um solo siltoso.....	24
Figura 4 — Configurações de sistemas de coberturas secas, segundo O’Kane <i>et al.</i> (2002).	30
Figura 5 — Balanço hídrico em um sistema de cobertura seca.....	37
Figura 6 — Qualidade das coberturas das plantas em função do Índice de Área Foliar.....	47
Figura 7 — Umidade Limite de Plantas <i>versus</i> sucção do solo.....	49
Figura 8 — Formas das funções representativas das captações radiculares potenciais: (a) triangular e (b) retangular.....	50
Figura 9 — Processo simplificado de modelagem numérica no software VADOSE/W.....	52
Figura 10 — Geometria e definição da malha de elementos finitos.....	55
Figura 11 — Curvas de retenção de água dos materiais.....	56
Figura 12 — Curvas de condutividade hidráulica não saturada dos materiais.....	56
Figura 13 — Localização geográfica do ponto de coleta de dados climáticos.....	57
Figura 14 — Precipitação anual do período 2000-2019.....	58
Figura 15 — Precipitação mensal para os anos de máxima, média e mínima precipitação...	58
Figura 16 — Precipitação diária para as condições máxima (2009), média (2008) e mínima (2013)	59
Figura 17 — Temperaturas máxima e mínima diária para as condições de precipitação máxima (2009), média (2008) e mínima (2013)	59
Figura 18 — Umidade relativa do ar diária para as condições de precipitação máxima (2009), média (2008) e mínima (2013)	60
Figura 19 — Velocidade dos ventos diária para as condições de precipitação máxima (2009), média (2008) e mínima (2013)	60

Figura 20 — Índices de Área Foliar.....	61
Figura 21 — Umidade Limite da Planta.....	61
Figura 22 — Profundidade das raízes ao longo do tempo.....	62
Figura 23 — Saturação ao longo do perfil A (a) sem vegetação e (b) com vegetação de IAF bom, considerando o período chuvoso do ano de precipitação média.....	65
Figura 24 — Saturação ao longo do perfil A (a) sem vegetação e (b) com vegetação de IAF bom, considerando o período seco do ano de precipitação média.....	67
Figura 25 — Saturação ao longo do perfil B nas condições sem vegetação e com vegetação de IAF bom, considerando o período chuvoso do ano de precipitação média..	69
Figura 26 — Saturação ao longo do perfil B (a); (c) sem vegetação e (b); (d) com vegetação de IAF bom, considerando o período seco do ano de precipitação média.....	71
Figura 27 — Saturação ao longo do perfil C nas condições sem vegetação e com vegetação de IAF bom, considerando o período chuvoso do ano de precipitação média..	73
Figura 28 — Saturação ao longo do perfil C (a); (c) sem vegetação e (b); (d) com vegetação de IAF bom, considerando o período seco do ano de precipitação média.....	75
Figura 29 — Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação máxima.....	79
Figura 30 — Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação média.....	79
Figura 31 — Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação mínima.....	80
Figura 32 — Transpiração acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação máxima.....	81
Figura 33 — Transpiração acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação média.....	81
Figura 34 — Transpiração acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação mínima.....	82
Figura 35 — Escoamento acumulado em função da vegetação e do tempo – precipitação máxima.....	83
Figura 36 — Escoamento acumulado em função da vegetação e do tempo – precipitação média.....	83
Figura 37 — Escoamento acumulado em função da vegetação e do tempo – precipitação mínima.....	84

Figura 38 — Percolação acumulada em função da vegetação e do tempo, considerando a condição de precipitação máxima.....	85
Figura 39 — Percolação acumulada em função da vegetação e do tempo, considerando a condição de precipitação média.....	85
Figura 40 — Percolação acumulada em função da vegetação e do tempo, considerando a condição de precipitação mínima.....	86
Figura 41 — Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação máxima.....	87
Figura 42 — Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação média.....	87
Figura 43 — Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação mínima.....	87
Figura 44 — Transpiração acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação máxima.....	88
Figura 45 — Transpiração acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação média.....	88
Figura 46 — Transpiração acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação mínima.....	89
Figura 47 — Percolação anual acumulado em função da vegetação e do tempo – precipitação média.....	90
Figura 48 — Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação máxima.....	91
Figura 49 — Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação média.....	91
Figura 50 — Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação mínima.....	91
Figura 51 — Percolação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação média.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	— Métodos de medição da sucção.....	25
Tabela 2	— Tipos de camadas de cobertura e materiais constituintes.....	33
Tabela 3	— Especificações para camadas de cobertura alemãs.....	34
Tabela 4	— Sistemas de cobertura estadunidenses.....	35
Tabela 5	— Especificações de sistemas de coberturas de diversos países.....	36
Tabela 6	— Métodos indiretos de determinação da evaporação.....	44
Tabela 7	— Condições iniciais e de ajuste das curvas de retenção e de condutividade hidráulica.....	56
Tabela 8	— Saturação ao longo do perfil A, em função da profundidade e das condições de vegetação, para o período chuvoso do ano.....	66
Tabela 9	— Saturação ao longo do perfil A, em função da profundidade e das condições de vegetação, para o período seco do ano.....	68
Tabela 10	— Saturação ao longo do perfil B, em função da profundidade e das condições de vegetação, para o período chuvoso do ano.....	70
Tabela 11	— Saturação ao longo do perfil B, em função da profundidade e das condições de vegetação, para o período seco do ano.....	72
Tabela 12	— Saturação ao longo do perfil C, em função da profundidade e das condições de vegetação, para o período chuvoso do ano.....	74
Tabela 13	— Saturação ao longo do perfil C, em função da profundidade e das condições de vegetação, para o período seco do ano.....	76
Tabela 14	— Balanço hídrico do perfil A.....	86
Tabela 15	— Balanço hídrico do perfil B.....	90
Tabela 16	— Balanço hídrico do perfil C.....	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Modelagens numéricas realizadas.....	63
Quadro 2 — Condições de contorno climáticas: precipitação média.....	108
Quadro 3 — Condições de contorno climáticas: precipitação máxima.....	118
Quadro 4 — Condições de contorno climáticas: precipitação mínima.....	128

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Sólidos
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
ETC	Comitê Técnico Europeu
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos do Ceará
IAF	Índice de Área Foliar
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil
IPCC	Intergovernmental Panel On Climate Change
ONU	Organização Das Nações Unidas
UML	Umidade Limite da Planta
USEPA	United States Environmental Protection Agency

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Considerações gerais.....	13
1.2	Objetivos.....	16
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	16
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	17
1.3	Estrutura do trabalho.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	Fluxo de água em solos não saturados.....	18
2.1.1	<i>Sucção.....</i>	20
2.1.2	<i>Curva de retenção de água.....</i>	22
2.1.3	<i>Métodos para medição da sucção.....</i>	25
2.1.4	<i>Curva de condutividade hidráulica.....</i>	26
2.2	Coberturas secas.....	27
2.2.1	<i>Tipos de coberturas secas.....</i>	28
2.2.2	<i>Configurações típicas de camadas de coberturas.....</i>	32
2.2.3	<i>Balanco hídrico de sistemas de coberturas secas.....</i>	37
2.2.4	<i>Modelagens numéricas de sistemas cobertura secas.....</i>	38
2.3	Interação solo-planta-atmosfera em sistemas de coberturas secas.....	40
2.3.1	<i>Influência da vegetação no desempenho de coberturas secas.....</i>	41
2.3.2	<i>Evapotranspiração.....</i>	43
2.3.3	<i>Índice de Área Foliar.....</i>	46
2.3.4	<i>Umidade Limite da Planta.....</i>	48
2.3.5	<i>Perfil de Zona Radicular.....</i>	49
3	MATERIAS E MÉTODOS.....	51
3.1	Modelagem numérica com o software VADOSE/W.....	51

3.2	Caracterização do material, geometria, definição da malha de elementos finitos e condições de contorno iniciais.....	54
3.3	Condições de contorno climáticas.....	57
3.4	Condições de contorno de vegetação.....	61
3.5	Modelos numéricos e aspectos complementares.....	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
4.1	Saturação.....	64
4.1.1	<i>Perfil A</i>	64
4.1.2	<i>Perfil B</i>	68
4.1.3	<i>Perfil C</i>	72
4.1.4	<i>Considerações gerais sobre a saturação dos sistemas de coberturas secas</i>	76
4.2	Balanço hídrico.....	78
4.2.1	<i>Perfil A</i>	78
4.2.2	<i>Perfil B</i>	86
4.2.3	<i>Perfil C</i>	90
4.2.4	<i>Considerações gerais sobre o balanço hídrico dos sistemas de cobertura</i>	93
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	96
	REFERÊNCIAS.....	98
	APÊNDICE A – CONDIÇÕES DE CONTORNO CLIMÁTICAS.....	109

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Na contemporaneidade, os hábitos humanos são marcados pelo excessivo consumo dos recursos naturais e materiais e pela crescente demanda por bens de consumo. Consequentemente, a produção e o descarte de resíduos são intensificados, exigindo sistemas de coleta e tratamentos mais complexos e dispendiosos.

Nesse contexto, a Organização das Nações Unidas (ONU) apresentou a Agenda 2030 com 17 objetivos de desenvolvimento sustentável, em que são atribuídas metas para o combate aos principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no Brasil e no mundo. Encontram-se, entre eles, a promoção e garantia de padrões de consumo e de produção sustentáveis, estabelecendo como meta alcançar, até 2030, a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais e a redução substancial da geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso (ONU, 2015).

Foram gerados no Brasil, em 2018, 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. Desse montante, 92% (72,7 milhões) foram coletados, o que evidencia que 6,3 milhões de toneladas de resíduos não foram recolhidos (ABRELPE, 2019).

O aspecto da destinação final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil é muito complexo, visto que o Brasil tem dimensões continentais e realidades sociais, políticas e econômicas diversas em suas regiões. Algumas grandes cidades possuem estrutura para dar ao resíduo sólido urbano o destino correto, entretanto muitas outras não dispõem dessa estrutura e convivem ainda com a realidade dos lixões, contribuindo para a contaminação ambiental e populacional.

A destinação adequada em aterros sanitários recebeu 59,5% dos resíduos sólidos urbanos coletados: 43,3 milhões de toneladas. O restante (40,5%) foi despejado em locais inadequados por 3.001 municípios. Ou seja, 29,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) acabaram indo para lixões ou aterros controlados, que não contam com um conjunto de sistemas e medidas necessários para proteger a saúde das pessoas e o meio ambiente contra danos e degradações (ABRELPE, 2019).

Nesse contexto, diversas medidas legais são consideradas para promover o combate à destinação irregular de resíduos. A Lei 14.206, conhecida como o Novo Marco do Saneamento (BRASIL, 2020) alterou a Lei 12.305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos

(BRASIL, 2010), dispondo sobre medidas de colaboração com a iniciativa privada para a gestão de resíduos nas diversas localidades do Brasil e instituindo novos prazos para a erradicação dos lixões, estabelecendo prazo máximo como agosto de 2024.

Dessa forma, torna-se cada vez mais necessário o conhecimento e a compreensão do comportamento e desempenho dos aterros sanitários, que são, segundo a NBR 8419 (ABNT, 1992), baseados na técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

As camadas de cobertura exercem papel fundamental na eficiência do sistema de um aterro, visto que são o elo entre o ambiente interno dos resíduos e a atmosfera. Sua utilização tem a função de proteger a saúde humana e do meio ambiente, minimizar a infiltração de água da chuva e de gases externos nas camadas de resíduo, diminuir a formação de lixiviado, controlar o fluxo de gases e a migração para a atmosfera dos gases gerados pela decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos, reduzir a presença de vetores de doenças e odores, diminuir a erosão e contribuir para a estabilidade e redução de recalques na estrutura (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993).

A despeito de sua importância, não há, no Brasil, uma padronização de critérios técnicos para instalação e operacionalização das camadas de cobertura de aterros quanto ao tipo de solo a ser utilizado e técnicas de execução de camadas de coberturas de aterros. Verifica-se, ainda, a existência de variações em âmbito internacional, nacional e regional de especificações e recomendações, que são feitas em função do clima, da taxa de precipitação, da radiação solar, da qualidade e das características do solo disponível próximo à área de disposição do resíduo, da classificação e das características físicas, químicas e biológicas dos resíduos dispostos, entre outros.

Aplicam-se, majoritariamente, devido à simplicidade de constituição e execução, as camadas de coberturas convencionais, que são, segundo Zornberg *et al.* (2003), constituídas de solo fino de baixa condutividade hidráulica, podendo, ainda, serem compostos de camadas intercaladas de solo natural argiloso e geossintéticos.

A cobertura final deve ser dimensionada a partir dos materiais disponíveis e das características climatológicas da região onde o aterro se encontra instalado. Faz-se necessário, por sua vez, o entendimento e o estudo das propriedades geotécnicas dos materiais selecionados para que se tenha a segurança e a eficiência desejada no projeto de sistemas de cobertura.

A eficiência da aplicação de sistemas de coberturas secas tem sido comprovada por diversas pesquisas, apontando, principalmente, a minimização da Drenagem Ácida de Mina (DAM) de rejeitos e a possibilidade de utilização de materiais alternativos na composição das camadas de cobertura com adequada limitação da entrada de fluídos para o interior dos resíduos (MEND, 2001; AYRES *et al.*, 2002; ADSU-WUSU; YANFUL, 2006; O’KANE *et al.*, 2006; GALATTO *et al.*, 2007; TRIANE *et al.*, 2010; BORGHETTI SOARES *et al.*, 2009; 2010; 2012; SOUZA *et al.*, 2019).

Nesse contexto, a presença de vegetação nas camadas de coberturas pode influenciar seu desempenho em diversos aspectos, como na taxa de infiltração de água, na capacidade de armazenamento de água, na percolação da água, na emissão de gases, na temperatura, na sucção e na condutividade hidráulica dos solos, bem como promove alterações nos componentes do balanço hídrico e na própria estrutura do solo com o tempo. A vegetação promove, ainda, o processo de transpiração, componente da evapotranspiração do balanço hídrico de sistemas de cobertura-rejeito. As folhas das plantas interceptam parte das chuvas antes do impacto com o solo, reduzindo, assim, a energia da água e, conseqüentemente, o potencial erosivo. O sistema radicular raso das plantas aumenta a resistência da camada superficial contra os agentes erosivos, em especial água e vento. Além disso, a vegetação é capaz de promover conforto visual e estético.

Considerando os potenciais efeitos da vegetação no desempenho de sistemas de cobertura-rejeito, um parâmetro destaca-se na compreensão dos fenômenos supracitados: o Índice de Área Foliar (IAF). O IAF é um parâmetro adimensional compreendido como a relação entre a área total da face das folhas e a área da sombra da copa projetada de forma perpendicular na superfície do solo. O IAF representa o efeito da cobertura vegetal na energia disponível para extrair água da superfície do solo, sendo o maior controlador da transpiração das plantas. Uma cobertura vegetal com uma IAF grande tem um potencial maior de extrair água (FREDLUND *et al.*, 2012).

Dessa forma, o IAF influencia vários processos superficiais, como fotossíntese, transpiração, evaporação e balanço de radiação da superfície, sendo, por isso, um dos mais

importantes parâmetros de entrada de modelos numéricos que representem a interação solo-vegetação-atmosfera, sendo de difícil estimativa devido a sua variabilidade espacial e temporal (BREDA, 2003; WANG *et al.*, 2005; ISHIHARA; HIURA, 2011; YAN *et al.*, 2012).

Em âmbito internacional, destacam-se trabalhos que estudaram a influência da presença de vegetação nos parâmetros dos solos que compõem as camadas de cobertura, como a sucção, a temperatura, o fluxo de gases e de água pelos meios não saturados (XIAOLI *et al.*, 2011; SINNATHAMBY *et al.*, 2014; NG *et al.*, 2013, 2014, 2016, 2019; LEUNG, 2016; NI *et al.*, 2017, 2019). Apesar da importante contribuição desses estudos, as condições climáticas consideradas são predominantemente de regiões da Ásia, de clima úmido e regime de precipitação diverso do que ocorre na região Nordeste do Brasil.

Poucos estudos com esse enfoque foram realizados em âmbito nacional, devido às dificuldades na previsão, medição e obtenção de dados locais sobre a estrutura, densidade e profundidade das raízes, visto que a profundidade real das raízes é, usualmente, controlada pelas propriedades do solo e não somente pelo potencial da planta. O desenvolvimento não uniforme das raízes das plantas e a diversidade de espécies de acordo com a localidade, o clima e as características geomorfológicas dos solos representam limitações ao avanço do conhecimento da temática. Amorim (2008) estudou o tamanho das raízes de espécies brasileiras germinadas em experimento de coberturas de resíduos, constatando-se profundidades entre 30 e 40 cm. Entretanto, o crescimento não uniforme da vegetação, com o aparecimento de espécies não previstas e não germinadas pelo autor, implicou limitações no desenvolvimento das análises.

Diante das limitações e dificuldades técnico-operacionais das análises *in situ*, a utilização de modelos numéricos de simulação constitui importante alternativa para a expansão dos estudos na área, visto que permitem realizar simulações matemáticas de um processo físico real, tendo como vantagem a produção resultados mais rápidos quando comparados aos resultados obtidos por meio de medições em campo, que pode requerer meses ou anos para serem obtidos. O modelo numérico oferece, ainda, a possibilidade de simular diferentes geometrias e condições de contorno.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho de diferentes configurações de sistemas de coberturas secas de aterros sanitários, submetidas a condições climáticas da região subúmida do Ceará, no Nordeste

brasileiro, a partir de modelagens numéricas com auxílio do *software* VADOSE/W (GEOSTUDIO, 2007), considerando parâmetros de vegetação.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Análise paramétrica da influência da vegetação, a partir da variação do Índice de Área Foliar, nos parâmetros de balanço hídrico – evaporação, transpiração, armazenamento, escoamento e percolação – nas diferentes configurações das camadas de cobertura quando submetidas às condições de contorno climáticas dos períodos de máxima, média e mínima precipitação anual adotadas;
- b) Análise da influência da vegetação no desempenho da saturação ao longo do tempo, considerando a condição de precipitação média e a camada de cobertura sem vegetação e com vegetação de IAF bom;

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho estrutura-se em cinco capítulos. O capítulo 1 refere-se à introdução e apresenta uma contextualização dos aspectos relevantes do tema de que trata esta dissertação, como a problemática dos resíduos sólidos e da disposição final em aterros sanitários, a importância do estudo das camadas de cobertura e das contribuições da utilização da vegetação em sua composição.

O capítulo 2 refere-se à revisão bibliográfica e apresenta os principais conceitos e estudos referentes ao tema de fluxo em solos não saturados, aterros sanitários e suas camadas de cobertura, componentes do balanço hídrico e influência da vegetação no desempenho de coberturas de aterros. No capítulo 3, são apresentados os materiais e métodos adotados nesta dissertação, destacando-se a caracterização hidráulica dos solos que compõem as camadas de cobertura, a geometria, a definição das características das malhas de elementos finitos, as condições de contorno climáticas, de vegetação, hidráulica e uma descrição do modelo numérico, do *software* e das simulações realizadas.

O capítulo 4 é destinado à apresentação e discussão dos resultados. O capítulo 5 apresenta as considerações finais acerca do estudo desenvolvido. Ademais, apresentam-se as referências e o apêndice com detalhamento de dados de entrada das modelagens.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fluxo de água em solos não saturados

O fluxo da água pode ocorrer em condições saturadas ou não saturadas dos poros (ou vazios) de um perfil de solo. As condições saturadas implicam o preenchimento total dos poros do solo pelo fluido, enquanto as condições não saturadas são caracterizadas pela presença de água e ar (LIBARDI, 2012).

De forma geral, para que haja fluxo de qualquer fluido em um meio qualquer, é necessário que haja diferença de energia ou potencial, de modo a estabelecer um movimento que parte do ponto de maior potencial para o ponto de menor potencial. O potencial total apresentado pelos solos não saturados pode ser descrito conforme as componentes da Equação 1 (BAVER; GARDNER, 1972).

$$P_{\text{total}} = P_{\text{temp}} + P_z + P_{\text{cin}} + P_p + P_{\text{pn}} + P_m + P_{\text{osm}} \quad (1)$$

Em que:

P_{total} – Potencial total da água no solo;

P_{temp} – Potencial térmico da água no solo;

P_z – Potencial de posição ou gravitacional;

P_{cin} – Potencial cinético da água no solo;

P_p – Potencial de pressão da água no solo;

P_{pn} – Potencial pneumático da água no solo;

P_m – Potencial matricial da água no solo;

P_{osm} – Potencial osmótico da água no solo.

O potencial térmico é importante para situações em que haja diferenças de temperatura relevantes dentro do domínio de interesse do estudo, como em estudos geotécnicos envolvendo fluxo de água ou transporte de fluidos. O potencial gravitacional, por sua vez, é decorrente do campo gravitacional da Terra, de forma que quanto mais distante do centro do planeta, maior será o potencial gravitacional atribuído.

O potencial pneumático refere-se à influência da pressão do ar nos processos de fluxo, particularmente em um solo não saturado. Admite-se, para casos gerais, quando se pode considerar a hipótese de continuidade da fase gasosa nos vazios do solo, a pressão intersticial

como igual à atmosférica. Quando presentes, os gradientes térmicos e pneumático são de grande relevância no estudo do fluxo do ar intersticial em casos de problemas multifásicos. O potencial cinético, por sua vez, é decorrente da situação em que há movimento da água nos vazios do solo. Em problemas geotécnicos de fluxo de água em solos é possível desprezar essa componente, entretanto consideram-se valores de velocidade de fluxo da ordem de 10^{-1} cm/s ou 10^{-3} m/s como bastante elevados (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

As componentes de energia decorrente da pressão na água, ou pressão neutra (u), matricial e osmótica, possuem destaque na compreensão do fluxo de água em meio não saturado. Camapum de Carvalho *et al.* (2015) explicam que para o caso de regiões situadas abaixo do nível do lençol freático, por exemplo, a pressão na água será maior ou menor conforme a sua distância da superfície do lençol freático e o potencial matricial será nulo, já que todos os vazios do solo estão preenchidos por água e os fenômenos capilares e de adsorção deixam de ter atuação no problema de fluxo.

Para o caso da porção de solo situada entre a superfície do lençol freático e o nível do terreno, denominada de zona não saturada ou zona vadosa, embora a pressão, na água intersticial, sofra a influência do lençol freático, principalmente se dentro da franja capilar, os valores de pressão na água são menores que a pressão atmosférica (ou que a pressão de ar no caso de um potencial pneumático não nulo) e são uma função do conteúdo de água remanescente no solo (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

Denomina-se de potencial matricial o efeito conjunto dos fenômenos de potencial de capilaridade (P_{cap}) e de adsorção (P_{ads}) sobre a energia livre da água do solo, conforme Equação 2.

$$P_m = P_{cap} + P_{ads} \quad (2)$$

O potencial matricial descreve a contribuição das forças de retenção da água no solo associadas com suas interfaces líquido-ar-sólido-líquido (coesão, adesão, tensão superficial, capilaridade). Para remover a água retida por estas forças se demanda energia, de forma que a quantidade de energia necessária para remover uma unidade de água será crescente à medida que o solo for perdendo umidade. Dias (2018) esclarece que potencial matricial está diretamente relacionado com o conteúdo de água no solo, e para as mesmas condições estruturais, observa-se diminuição no potencial matricial à medida que se reduz a umidade do solo.

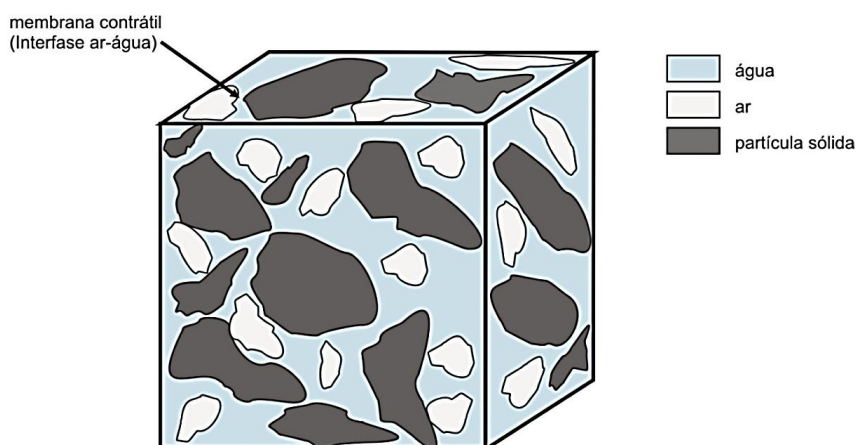
O potencial capilar no solo, por sua vez, é definido como sendo o trabalho necessário para a remoção de uma unidade de massa de água do solo. As diferenças de potencial de um ponto para outro no solo determinam a direção, o fluxo e o trabalho necessário para provocar esse fluxo, sendo que a tendência da água é atingir o equilíbrio com menor energia (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

O potencial osmótico, por fim, relaciona-se com a característica da água de tornar as suas moléculas mais próximas, aumentando-se, assim, a magnitude de suas forças de coesão, à medida que há adição de solutos à sua composição. Dessa forma, o deslocamento da água dá-se do ponto de menor concentração para o de maior concentração (REICHARDT; TIMM, 2004).

2.1.1 Sucção

Os solos saturados são compostos por duas fases: sólida, constituída pelos grãos de solo, e líquida, constituída por água (acrescida de sais minerais e ar dissolvido). Quanto aos solos não saturados, Lambe e Whitman (1969) propuseram sua estrutura como um sistema trifásico, formado pelas fases sólida (partículas e minerais), líquida (água) e gasosa (ar). Fredlund e Morgenstern (1977) ainda acrescentaram ao conceito uma quarta fase formada pela interação entre a fase gasosa não dissolvida e a fase líquida – denominada de membrana (ou película) contrátil, ilustrada na Figura 1.

Figura 1 – Representação das fases de um solo não saturado.



Fonte: Fredlund e Rahardjo (1993).

A membrana contrátil tem como propriedade a capacidade de tração, decorrente do surgimento de uma tensão superficial nos vazios do solo, semelhante ao que acontece com tubos capilares. Essa tensão superficial está relacionada à diferença de forças na interface entre a água

e o ar, que tende a produzir uma tração ao longo da membrana contrátil, uma vez que a pressão de ar (u_a) é maior do que a pressão de água (u_w). A essa diferença de pressões do ar e da água atribui-se a denominação sucção matricial (Ψ_m) (Equação 3).

$$\Psi_m = u_a - u_w \quad (3)$$

A sucção osmótica é, por sua vez, decorrente da concentração química da água no interior do solo, sendo a diferença entre a pressão de vapor em equilíbrio com a água pura e a pressão de vapor em equilíbrio com uma solução cuja composição é idêntica à da água do solo (RIOS, 2006). A soma entre sucção matricial e sucção osmótica (Ψ_o) resulta no entendimento da sucção total (Ψ), conforme Equação 4.

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_o \quad (4)$$

Marinho (1997) define a sucção como a pressão isotrópica da água intersticial, oriunda de condições físico-químicas, que faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação.

Outro entendimento do conceito, segundo Lee e Wray (1995), parte da situação de quando a água livre migra dentro do solo, ela pode ser adsorvida ou retida por ele. Para desprender esta água adsorvida, energia externa tem de ser aplicada. O valor da energia aplicada por unidade de volume de água para desprendê-la pode ser entendida como a sucção. Em outras palavras, a sucção pode ser entendida como uma medida de tensão usada para avaliar a capacidade do solo de reter água.

Fredlund e Morgenstern (1977) afirmam que apenas a sucção matricial é suficiente para descrever o comportamento mecânico do solo não saturado (especialmente em solos com pouca salinidade). Conforme o entendimento de Cruz (1996), nos solos não saturados, a sucção matricial é a responsável pela contribuição no comportamento nas etapas de compressão e cisalhamento para diferentes graus de saturação, uma vez que a variação de umidade independe da sucção osmótica, que só tem relação com a concentração de sais.

É possível considerar a parcela osmótica da sucção insignificante diante do valor da sucção matricial (BLIGHT, 1983; EDIL *et al.*, 1981; FREDLUND; XING, 1994). Fredlund *et al.* (2012) destacam também a pouca variação de seus valores, comparado com a amplitude alcançada pela sucção matricial. Diante disto, é comum assumir, para compreensão de problemas geotécnicos, que os valores da sucção matricial e total são equivalentes.

Tem-se ainda que, para solos arenosos, como as forças de adsorção são pequenas, é possível associar a sucção matricial somente às forças capilares. Por fim, seguindo a equação do estado de energia livre de Gibbs para vapor de água, formou-se a base para a ideia de que sucção máxima do solo é de aproximadamente 10^6 kPa (FREDLUND *et al.*, 2012).

2.1.2 Curva de retenção de água

A curva de retenção de água, ou curva característica de sucção, é a expressão gráfica da relação do teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico), ou do grau de saturação de um solo com a sucção (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

À medida que há o decréscimo do grau de saturação do solo, a distribuição do sistema solo-água-ar é modificada, assim como o comportamento do estado de tensões no solo. Dessa forma, a relação da sucção é inversamente proporcional ao teor de umidade, ou seja, quando o teor de umidade se aproxima da saturação, o valor da sucção tende a zero (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

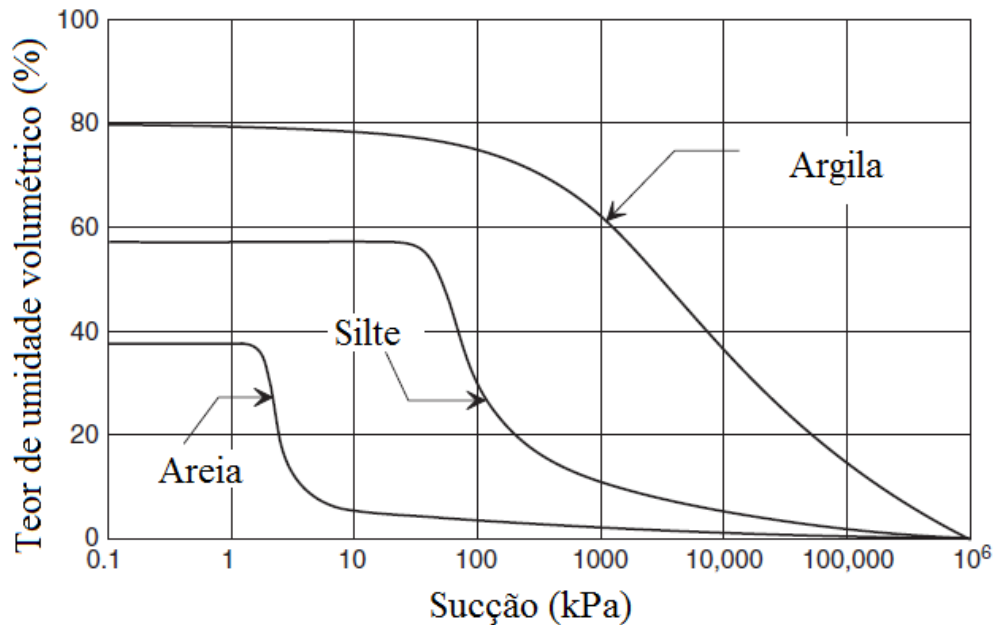
O teor de umidade volumétrica saturada (θ_s) representa, teoricamente, a porosidade do solo. O teor de umidade volumétrica residual (θ_r) é o valor do teor de umidade volumétrica além do qual um aumento adicional na carga de pressão resultará somente em mudanças pequenas no teor de umidade volumétrica. Já o valor de pressão de entrada de ar é o valor da carga de pressão no qual ocorre a entrada de ar nos poros do solo em um processo de secagem (MORALES, 2008).

Fredlund *et al.* (2012) afirmaram que, de forma geral, o teor de umidade volumétrica saturada e o valor de pressão de entrada de ar aumentam conforme aumenta a plasticidade do solo. O formato da curva de retenção de água depende do tipo de solo e da sua distribuição granulométrica. Outros fatores, como o histórico de formação, composição mineralógica e a estrutura secundária dos solos também são apontados como fatores de influência nas características da curva de retenção de água.

Solos com granulometria mais fina tendem a ter uma variação de sucção numa faixa mais ampla para uma dada variação volumétrica quando em comparação a solos mais arenosos. Em solos argilosos, o valor de entrada de ar tende a ser maior do que em solos arenosos. Quanto maior o teor de argila, maior será a quantidade de água retida e a perda de umidade será mais lenta a partir de quando a sucção atingir o ponto de entrada de ar. Já para os solos arenosos,

tem-se o entendimento de que por apresentarem maior dimensão dos poros, tendem a haver perda brusca da umidade (Figura 2).

Figura 2 – Curvas características típicas de areias, siltes e argilas.



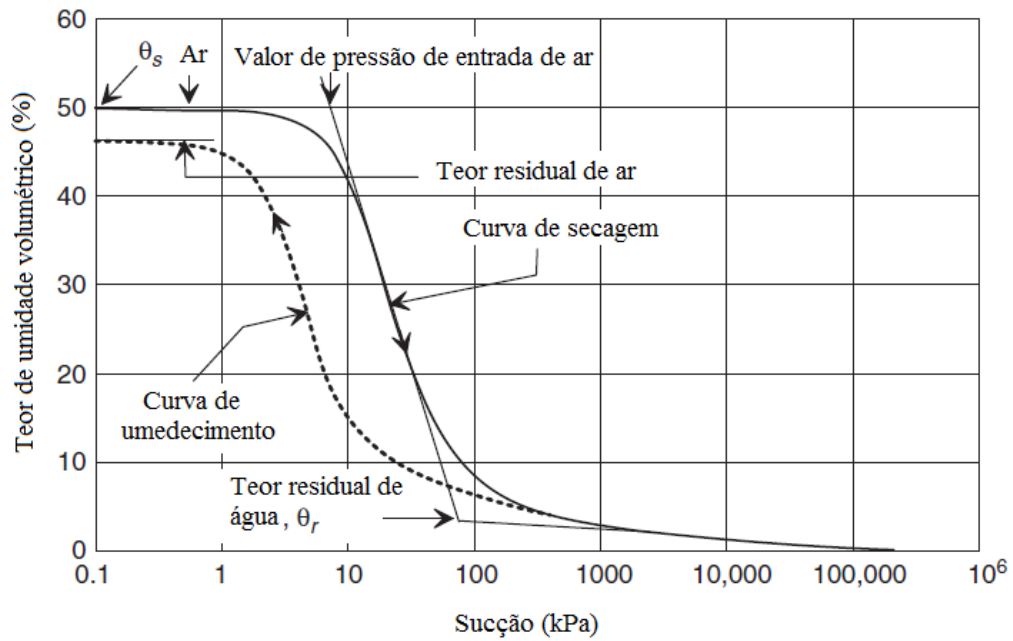
Fonte: Adaptado de Fredlund *et al.* (2012).

Segundo Fredlund e Xing (1994), outra característica importante da curva de retenção é o fenômeno da histerese, que significa que, a depender se a trajetória para sua determinação for de umedecimento ou de secagem, as curvas mostram diferentes formatos, ou seja, diferentes pares ordenados para o ramo de umedecimento e o ramo de secagem. Verifica-se, assim, conforme indica Presa (1982), que a quantidade de água retida no processo de secagem é maior do que a obtida no processo de umedecimento.

Alguns fatores são apontados como influenciadores do fenômeno de histerese, segundo Presa (1982):

- Geometria não uniforme dos poros individuais interconectados por pequenos canais;
- Influência do ângulo de contato solo-água, que devido à rugosidade da superfície do grão, varia segundo o avanço ou recuo do menisco;
- Ocorrência de ar aprisionado nos poros, reduzindo o teor de umidade no processo de umedecimento;
- História de secagem e umedecimento do material (Figura 3);
- Liberação gradual do ar dissolvido na água.

Figura 3 – Exemplo do fenômeno da histerese em curva de retenção de água de um solo siltoso.



Fonte: Adaptado de Fredlund *et al.* (2012).

A curva de retenção de água é tradicionalmente representada a partir da utilização de equações de ajuste e de pontos obtidos experimentalmente. A curva é apresentada continuamente, por isso há necessidade de modelos que se ajustem aos pontos experimentais, facilitando, assim, as análises.

Pode-se dizer que os dois modelos empíricos mais amplamente utilizados para a reprodução e ajuste da curva característica dos solos são os propostos por Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994), especificados nas Equações 5 e 6, respectivamente.

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{(1 + (\alpha\psi)^n)^{\frac{1}{n}}}{1 + (\alpha\psi)^n} \quad (5)$$

$$\theta = \theta_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right)} \right]^m \quad (6)$$

Em que:

θ – teor de umidade volumétrica para determinada sucção;

θ_r – teor de umidade volumétrica residual;

θ_s – teor de umidade volumétrica saturado;

ψ – sucção;

ψ_r – sucção para a umidade residual;

a – corresponde a uma aproximação do valor de entrada de ar do solo;

α , n e m – constantes empíricas, parâmetros de ajuste do modelo;

e – base dos logaritmos neperianos.

2.1.3 Métodos para medição da sucção

Os métodos de medição podem ser classificados em diretos e indiretos. Nos métodos diretos, há a medição da pressão da água nos vazios do solo. Já nos métodos indiretos, há a obtenção de um parâmetro que, por correlação com uma curva de calibração (umidade relativa, resistividade ou condutividade, por exemplo), permite a determinação do parâmetro sucção.

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2015), os quatro métodos mais comuns para a determinação da curva de retenção são a placa de sucção, a placa de pressão, o método do papel filtro e o método do equilíbrio de vapor. Esses métodos se destacam por serem largamente adotados e exigirem equipamentos e recursos laboratoriais relativamente simples. Essas técnicas devem ser encaradas, em certos casos, como complementares entre si, especialmente quanto à faixa de sucções possível em cada método. A Tabela 1 resume diversos métodos dispostos na literatura, especificando a faixa de medição da sucção, o tipo de sucção medida, o tempo aproximado de ensaio e algumas considerações sobre o processo de execução, vantagens e desvantagens.

Tabela 1 – Métodos de medição da sucção.

Método	Sucção	Faixa de medida (kPa)	Tempo de equilíbrio
Papel filtro (com solo em contato)	Matricial	0 a 100.000	7 dias
Papel filtro (sem solo em contato)	Total		7 a 14 dias
Placa de pressão	Total	0 a 1.500	7 a 14 dias
Equilíbrio da fase vapor	Total	400	Dias
Funil de pedra porosa	Matricial	0 a 70	Horas
Membrana de pressão	Matricial	até 10.000	Dias
Tensiômetro	Matricial	0 a 70	Minutos
Blocos Porosos	Matricial	10 a 1.000	Semanas
Psicômetros	Total e Osmótica	100 a 8.000	Minutos
Princípios Osmóticos	Matricial	200 a 1.600	Horas

Fonte: Vilar (2002); Silva (2005); Camapum de Carvalho *et al.* (2015).

2.1.4 Curva de condutividade hidráulica

Quando o fluxo de água ocorre na zona não saturada, ou zona vadosa, caracterizada por possuir um grau de saturação à água inferior a 100%, há uma predominância de fenômenos em que o conhecimento da curva de condutividade hidráulica e da curva de retenção de água pelo solo é fundamental (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

Reichardt e Timm (2004) explicam que quando o solo é saturado, todos os poros estão preenchidos por água e atuam como condutores, implicando uma condição máxima de condutividade hidráulica. Entretanto, quando não saturado, os poros do solo tornam-se preenchidos de ar e de água, tendo sua porção condutora da área transversal do solo decrescida. O valor da condutividade hidráulica decresce rapidamente com o decréscimo do teor de umidade volumétrica, devido à diminuição da área útil para a condução da água. Fredlund e Rahardjo (1993) citam que, em solos não saturados, a permeabilidade é significativamente afetada pelas mudanças no índice de vazios e no grau de saturação (ou teor de umidade).

Curva de condutividade hidráulica é a representação gráfica da função que relaciona a condutividade hidráulica do solo não saturado com o seu correspondente conteúdo de água (grau de saturação ou umidade volumétrica) ou poropressão (ou sucção matricial) para uma porosidade específica. Dessa forma, o coeficiente de permeabilidade saturado passa a representar uma condição particular na curva de condutividade hidráulica do solo não saturado (BICALHO *et al.*, 2007; CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

O fluxo de água em solos não saturados pode ser descrito através de três variáveis não lineares relacionadas: a umidade volumétrica, a sucção mátrica e a condutividade hidráulica (FREDLUND; RAHARDJO, 1993). Além do uso de experimentos de campo e de laboratório, a curva característica é importante ferramenta para estimativa da curva de condutividade hidráulica, conforme afirmam Machado e Zuquette (2004). Dos diversos métodos encontrados na literatura, destacam-se os métodos proposto por Mualem (1976) (Equação 7) e Van Genuchten (1980) (Equação 8) para a determinação da curva de condutividade hidráulica a partir da curva característica de sucção.

$$k = k_{\text{sat}} \frac{[1 - (\alpha \Psi^{mn})(1 + (\alpha \Psi^n)^{-m})^2]^{\frac{m}{2}}}{(1 + (\alpha \Psi^n)^{\frac{1}{2}})}; \text{ para } \Psi > 0 \quad (7)$$

$$k = k_{\text{sat}} \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right) \right]^2 \quad (8)$$

Em que:

$l = 0,5$;

k_{sat} – condutividade hidráulica saturada.

2.2 Coberturas secas

Os sistemas de coberturas secas podem ser entendidos como o conjunto de camadas com diferentes configurações, espessuras e materiais dimensionados para cobrir depósitos de diversos tipos de resíduos, como resíduos sólidos urbanos e rejeitos de mineração. Seu objetivo é limitar o fluxo de fluidos para o interior e exterior da massa de resíduos, reduzindo a produção de elementos tóxicos e danosos ao meio ambiente, resultantes dos processos físico-químicos envolvidos na degradação dos resíduos contidos (SOUZA, 2018).

A denominação “coberturas secas” (*dry covers*) é utilizada em contraposição à denominação “coberturas úmidas” (*wet covers*), segundo Souza; Borma e Mendonça (2003). Embora as coberturas secas sejam constituídas, na maioria das vezes, por camadas de solos de diferentes propriedades, o termo “cobertura de solo” não é o mais apropriado, uma vez que para sua execução podem ser utilizados outros tipos de materiais, tais como os geossintéticos ou resíduos resultantes de outras atividades, desde que apresentem as propriedades geotécnicas necessárias à minimização da entrada e saída de fluidos.

Observa-se uma diversidade de tipos de materiais que podem ser empregados na composição de coberturas secas, como solos naturais, rejeitos de mineração, resíduos não reativos e materiais geossintéticos (MEND, 2001). Um sistema de coberturas secas pode ser executado em uma ou múltiplas camadas, com diferentes funções, tais como barreira capilar, barreira reativa, barreira impermeabilizante, camada drenante, camada de suporte à vegetação etc.

Boscov (2008) adverte que múltiplas solicitações são impostas aos sistemas de cobertura, como variações de temperatura, recalques dos maciços devido à decomposição dos resíduos, movimentos de veículos, erosão decorrente da ação da água e do vento, ciclos de umedecimento e secagem. Essas solicitações podem comprometer o sistema de cobertura, implicando uma perda de estanqueidade e o surgimento de fissuras e trincas, que criam caminhos preferenciais de fluxo e, conseqüentemente, aumentam a permeabilidade das camadas de cobertura.

As camadas dos sistemas de coberturas secas, por estarem sujeitas às variações das condições climáticas, apresentam variações nos perfis de umidade, saturação e poropressão ao longo da profundidade e do tempo, especialmente para regiões onde há períodos chuvosos e secos bem definidos. Majoritariamente, as camadas se encontram em um estado não saturado e o fluxo de água pode ser descrito pela equação de Richards, considerando válida a Lei de Darcy. Além da condutividade hidráulica do solo na condição saturada (convencionalmente designada como permeabilidade), é necessário o conhecimento das curvas de retenção (ou curva característica) e de condutividade hidráulica.

Diversos fatores devem ser observados quando se deseja elaborar um projeto de um sistema de cobertura final, destacando-se, segundo Barros (2005), o tipo e a classe do resíduo a ser coberto, o clima, a estabilidade dos taludes do sistema de cobertura, a recuperação da área do aterro, a disponibilidade de material com adequabilidade técnica requerida e o balanço hídrico local (em especial, do índice pluviométrico, visto que influencia diretamente a necessidade de maior ou menor coeficiente de permeabilidade do material a ser utilizado como cobertura).

O’Kane *et. al* (2002) definiram uma sequência básica de etapas para a elaboração de um projeto de coberturas secas, quais sejam:

- a) Definição da finalidade operacional da cobertura;
- b) Escolha e caracterização dos materiais de composição da cobertura;
- c) Caracterização do histórico dos parâmetros climáticas do local de execução;
- d) Classificação do tipo e reatividade do resíduo a ser contido;
- e) Elaboração de uma modelagem numérica para o correto dimensionamento das coberturas secas;
- f) Concepção de um modelo físico experimental;
- g) Definição de uma metodologia de monitoramento de parâmetros em campo.

2.2.1 Tipos de coberturas secas

As coberturas secas podem ser classificadas, em função do número de camadas utilizadas, como simples ou complexas. As coberturas simples são constituídas por uma camada de solo local não compactado, sendo empregadas principalmente no suporte da vegetação em depósitos de resíduos não reativos. Sistemas de cobertura compostos, por sua vez, são

constituídos por várias camadas de solo ou de materiais alternativos – geossintéticos ou outros tipos de resíduos, por exemplo – com o objetivo principal de controlar a entrada e a saída de fluídos (oxigênio e água, principalmente) da massa de resíduos, no caso de resíduos sólidos, e a drenagem ácida de minas, no caso de camadas de coberturas sobre rejeitos de mineração (SOUZA; BORMA; MENDONÇA, 2003).

Os autores explicam, ainda, que a camada argilosa é considerada a mais importante de um sistema de cobertura seca, pois tem a função de mitigar o fluxo de água e oxigênio para o interior da massa de rejeitos. Para sua execução, solos com alto teor de argila são compactados em camadas, entre 0,6 e 1,5 m de espessura, de acordo com as características dos resíduos e das condições climáticas locais.

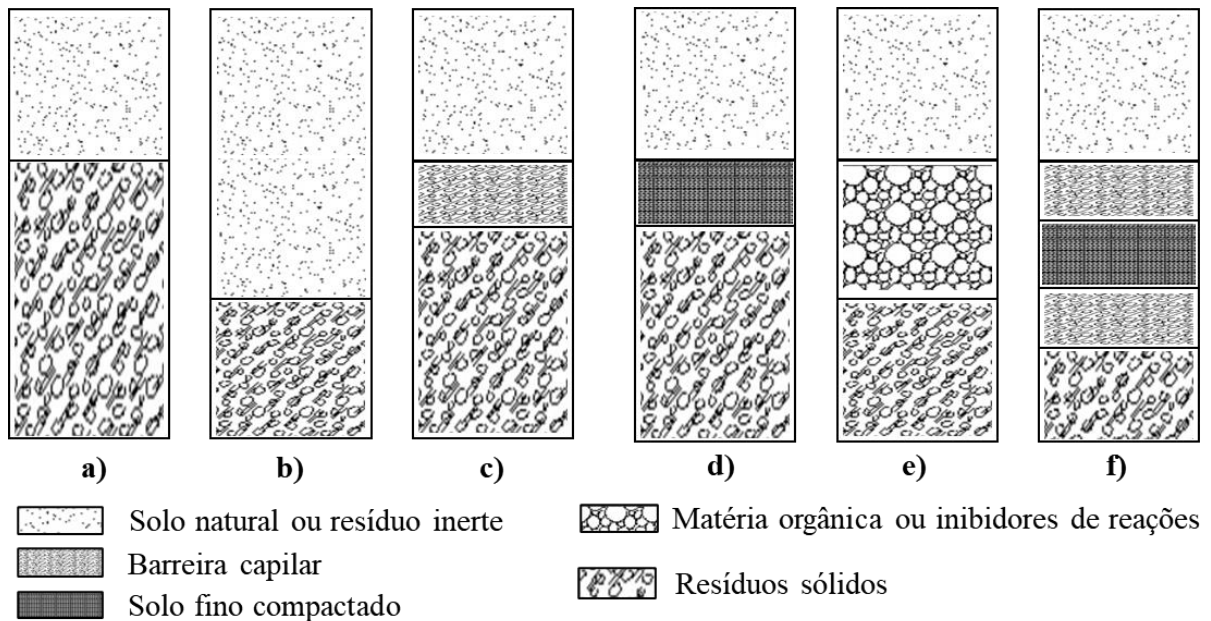
Em geral, a condutividade hidráulica desejada para a camada argilosa é igual ou inferior a 1×10^{-9} m/s e a obtenção e a manutenção desse valor em campo ao longo do período de vida da cobertura é de um desafio operacional (SOUZA; BORMA; MENDONÇA, 2003). O ressecamento e os recalques são os principais fatores de degradação, uma vez que a camada argilosa é bastante vulnerável ao ressecamento e possui baixa resistência aos ciclos de umedecimento e secagem, apresentando com frequência fissuras e rachaduras.

O controle do fluxo do gás oxigênio pela camada argilosa é obtido mediante a manutenção de um elevado grau de saturação sob diferentes condições climáticas. O oxigênio tem a sua difusão dificultada pela água, sendo o coeficiente de difusão do oxigênio em uma camada de solo argiloso inversamente proporcional ao grau de saturação de água dessa camada (YANFUL, 1993).

Como resultado, somente se terá uma barreira efetiva contra a difusão do oxigênio se o grau de saturação do material argiloso for mantido a valores superiores a 85%, mesmo nos períodos com baixas precipitações, como os observados em climas áridos e semiáridos. A redução na velocidade de percolação de água através da barreira argilosa reduz a quantidade de água contaminada liberada a partir desses depósitos, diminuindo os custos de tratamento (YANFUL, 1993).

O’Kane *et al.* (2002) apresentaram diferentes configurações de sistemas de coberturas secas (Figura 4), que são definidas considerando a viabilidade técnica e financeira da execução das camadas, a disponibilidade e a proximidade da jazida de empréstimo do material, topografia do terreno e características da vegetação nativa.

Figura 4 – Configurações de sistemas de coberturas secas, segundo O’Kane *et al.* (2002).



Fonte: Autor (2021).

O modelo convencional (Figura 4a), ou básico, é o modelo inicialmente adotado, de configuração simplificada. Adota-se a disposição de um material (solo ou resíduo inerte) não compactado acima da massa de resíduos. Tem-se como principal função permitir o desenvolvimento de uma vegetação superficial, a fim de auxiliar na proteção das camadas inferiores contra a infiltração da chuva e a erosão. A capacidade de limitação da percolação também é considerada, embora não seja seu objetivo principal. É um modelo indicado para condições de resíduos não reativos.

Barroso (2008) e Araujo (2017) indicam a importância de haver planejamento e controle da vegetação, visto que as espécies cultivadas influenciem na definição de espessuras da camada, pois caso a escolha seja errônea, as raízes podem atingir profundidades maiores alcançando camadas que estão situadas abaixo, ocasionando trincas e comprometendo a eficiência do sistema de cobertura final.

Koerner e Daniel (1997) sugerem que as areias granulometria média apresentam condições favoráveis à germinação de sementes e promove, assim, o desenvolvimento adequado de raízes das plantas. Os solos de textura fina, por sua vez, como as argilas e siltes argilosos, são frequentemente férteis, entretanto podem apresentar dificuldades para o estabelecimento inicial da vegetação em períodos úmidos. Os solos arenosos, por fim, podem

ser inadequados por apresentarem baixa retenção de água e promover a perda de nutrientes por lixiviação.

O modelo de barreiras evapotranspirativas (Figura 4b) é semelhante ao modelo convencional, diferenciando-se, principalmente, pela execução de uma camada de solo mais espessa (igual ou superior a 1 m), com finalidade de diminuir a percolação de fluídos ao longo da cobertura e aumentar a capacidade de armazenamento de água.

Sua constituição baseia-se no processo de balanço hídrico, que parte do entendimento de que a percolação para o interior do maciço sanitário pode ser minimizada armazenando água na cobertura durante os períodos chuvosos e removendo-a por evapotranspiração através da vegetação ou evaporando-a da superfície do solo, funcionando, assim, como uma esponja ou reservatório, que armazena umidade durante eventos de precipitação e, em momentos de estiagem, libera de volta para a atmosfera como evapotranspiração (ZORNBERG *et al.*, 2003; CATAPRETA, 2008; SUN *et al.*, 2010; ZHANG; SUN, 2014; COSTA, 2015).

O sistema de cobertura do tipo barreira capilar (Figura 4c), por sua vez, consiste basicamente em uma camada de solo fino (argila ou silte argiloso) que se sobrepõe a uma camada de solo granular (usualmente areia, pedregulho, cascalho ou geotêxtil não tecido). As barreiras capilares usam a discrepância dos valores de condutividade hidráulica (entre solos finos e granulados) para melhorar a capacidade do solo fino reter água (BARROSO, 2008).

Nesse sistema de cobertura, a camada de solo fino tem a função de armazenar água até a posterior remoção do solo pelos mecanismos de evaporação e evapotranspiração. Já a camada de solo granular forma uma fratura capilar na interface entre as duas camadas, permitindo que a camada de solo fino retenha mais água que o sistema de cobertura monolítica de igual espessura. Portanto, a diferença de propriedades hidráulicas não saturadas entre as duas camadas minimiza a percolação na camada granular (abaixo) sob condições não saturadas. (USEPA, 2002; CATAPRETA, 2008; GUIZELINI, 2011).

No modelo de barreira impermeabilizante (Figura 4d), sob a camada de material não-compactado, executa-se uma camada de material fino compactado que recobre a massa de resíduos, formando uma barreira hidráulica de baixa permeabilidade. Por ter capacidade de armazenamento, ainda que em condições de baixa pluviosidade, devido ao seu reduzido volume de vazios associado ao seu baixo coeficiente de condutividade hidráulica, esse material, dependendo das condições climáticas, possibilita manter um elevado grau de saturação, o que

o permite funcionar, também, como barreira à difusão de oxigênio. A camada superior de material não-compactado funciona como meio de armazenamento e perda de água e para o desenvolvimento de vegetação superficial (SOUZA, 2018).

A barreira consumidora de oxigênio e inibidora de reações (Figura 4e) tem a função primordial de reduzir a concentração de oxigênio, utilizando-se de um material de natureza orgânica, como produtos do processo de compostagem e turfas. Essa configuração não adota a camada superficial de solo não-compactado, pois a camada principal já dispõe de elevado potencial para desenvolvimento de vegetação, devido à decomposição da matéria orgânica. Além disso, outros materiais podem ser utilizados na composição da camada principal, como materiais cimentícios, misturas de cinzas leves, geossintéticos etc.

Por fim, a barreira ao fluxo de oxigênio (Figura 4f) corresponde à mais complexa configuração dentre a classificação de O’Kane *et al.* (2002), visto que consiste em três camadas: uma camada de material granular, funcionando como barreira capilar, uma intermediária, composta de material fino compactado e uma outra de material granular.

Essa constituição confere à cobertura tanto uma barreira à percolação de água, quanto à difusão de oxigênio, sendo adotada ambientes sujeitos à prolongados períodos de seca, pois apresenta mecanismos que permitem a manutenção da saturação da camada intermediária, como a possibilidade, durante o período de precipitações, de armazenamento de água na camada superior para posterior manutenção da umidade da camada intermediária em períodos de seca. Ademais, a adoção de uma camada superficial de material não-compactado, para o desenvolvimento de vegetação, torna-se dispensável se o material da barreira capilar superior conseguir exercer essa função.

2.2.2 Configurações típicas de camadas de coberturas

Verifica-se, no Brasil, a ausência de normativas que unifiquem e padronizem as especificações técnicas e executivas de camadas de aterro de resíduos sólidos, bem como de suas coberturas, sendo possível encontrar linhas gerais de direcionamento nas NBR 1389 e NBR ISO 10318 (ABNT, 1997; ABNT, 2018) e em documentos específicos de instituições públicas (CETESB, 1993; MONTEIRO *et al.*, 2001).

O Instituto Brasileiro de Administração Municipal, por meio do Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos, estabeleceu recomendações de como deve ser composto o sistema de cobertura final de aterros de resíduos, conforme Tabela 2 (MONTEIRO *et al.* 2001).

Tabela 2 – Tipos de camadas de cobertura e materiais constituintes.

Camada	Tipo de camada	Materiais
1	Camada superficial	Solo, camada geossintética de controle de erosão, blocos rochosos
2	Camada de proteção	Solo, material residual recuperado ou reciclado, blocos rochosos
3	Camada drenante	Areia e/ou cascalho, georrede ou geocompósitos
4	Camada impermeabilizante	Argila compactada, geomembrana, camada geossintética
5	Camada de fundação ou coletora de gás	Areia e/ou cascalho, solo, georrede ou geotêxtil, material residual recuperado ou reciclado

Fonte: Monteiro *et al.* (2001); Huse (2007).

Para aterros de resíduos industriais classe I, conforme classificação disposta na NBR 10004 (ABNT, 2004), há a obrigatoriedade da constituição de uma cada impermeabilizante, não se estendendo a obrigatoriedade para aterros classe II. Recomenda-se que a camada seja constituída de uma manta plástica de espessura entre 0,8 e 1,2 mm ou de argila compactada com permeabilidade de 10^{-6} cm/s e espessura mínima de 50 cm (MONTEIRO *et al.*, 2001). A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1993), por sua vez, recomenda parâmetro mais conservador, indicando permeabilidade de 10^{-9} m/s.

Segundo Ojima e Hamada (1994), na prática nacional o que tem sido realizado é uma cobertura composta por solo argiloso compactado com espessura de 0,80 m e permeabilidade não superior 10^{-6} cm/s. Ainda, para a mitigação de fendas e fissuras provenientes do ressecamento excessivo e de recalques, adiciona-se uma camada de terra de 0,20 m de espessura, a fim de estabelecer o plantio de vegetação rasteira.

Em âmbito internacional, percebe-se uma variação de especificações entre os países e até mesmo entre estados de um mesmo país. Manassero *et al.* (2000) reforçam que essa variação se dá de maneira mais pertinente nos países subdesenvolvidos, em que a ausência de regulamentações fortalece práticas não padronizadas de execução.

Para resíduos sólidos municipais, o Comitê Técnico Europeu (ETC) recomenda a execução de uma camada de argila compactada com espessura mínima de 1 m e condutividade hidráulica inferior ou igual a 10^{-9} m/s. Para resíduos inertes, a recomendação é de 10^{-7} m/s (ETC 8, 1993 *apud* MANASSERO *et al.*, 2000).

Na Alemanha, por exemplo, propõe-se a utilização de camadas de 0,75 m de argila compactada aliada a geomembranas espessas que, por vezes, são protegidas por geotêxteis com

alta resistência à perfuração. As geomembranas devem dispor de espessura mínima de 2,5 mm e baixa condutividade hidráulica ($\leq 5 \times 10^{-10}$ m/s) (MANASSERO *et al.*, 2000; SIMON; MULLER, 2004).

Simon e Muller (2004) detalharam as indicações de composição padrão dos aterros de resíduos na Alemanha, conforme Tabela 3, para aterros de Classe I (resíduos de mineração com baixa contaminação, resíduos de construção e escavação civil) e Classe II (resíduos sólidos municipais). É válido ressaltar, segundo os autores, que variações na espessura e na condutividade hidráulica das camadas são possíveis quando verificadas condições técnicas que garantam a estabilidade e conservação em longo prazo.

Tabela 3 – Especificações para camadas de cobertura alemãs.

Componentes	Aterro Classe I	Aterro Classe II
Vegetação		Necessário
Solo de cobertura		Maior que 1 m
Camada de drenagem		Espessura $\geq 0,30$ m; Cond. Hidráulica $\leq 10^{-3}$ m/s
Camada de proteção	Não é necessário	Necessário
Geomembranas	Não é necessário	Espessura $\geq 2,5$ mm
Argila compactada		Espessura $\geq 0,30$ m; Cond. Hidráulica $\leq 5 \times 10^{-10}$ m/s
Camada de drenagem de gás	Não é necessário	Necessário
Camada de fundação ou regulação		Espessura $\geq 0,50$ m

Fonte: Simon e Muller (2004).

Na Áustria e na França, relata-se, segundo Brandl (1992), a utilização de camadas de drenagem com espessura mínima de 0,50 m.

No Japão, utiliza-se uma geomembrana dupla com uma camada de drenagem no meio, devido à indisponibilidade de argila em boa parte do país. Há também o uso de uma mistura de areia, cimento e bentonita e de camada asfáltica (TSUBOI *et al.*, 1997).

Na Austrália, observa-se que as variações geológicas e hidrogeológicas entre os diferentes estados-membros influenciam a composição das camadas de aterros de resíduos. De forma geral, é possível encontrar uma variação de 0,6 a 0,9 m de argila compactada como cobertura (MANASSERO *et al.*, 2000).

Nos Estados Unidos, segundo USEPA (2002), as camadas de coberturas podem adotar diversas configurações, conforme detalha a Tabela 4.

Tabela 4 – Sistemas de cobertura estadunidenses.

Tipo de cobertura	Sistema de camadas (Topo → Base)	Espessura (m)	Condutividade hidráulica (m/s)
Camada dupla (<i>Double Liner</i>)	Camada de superfície	0,30	-
	Camada de drenagem	0,30	10^{-4} a 10^{-5}
	Geomembrana (PVC) ou	0,00015	-
	Geomembrana (HDPE)	0,0007	-
	Argila	0,45	Não inferior a 10^{-7}
Camada composta (<i>Composite Liner</i>)	Camada de superfície	0,30	-
	Camada de drenagem	0,30	10^{-4} a 10^{-5}
	Geomembrana (PVC) ou	0,0007	-
	Geomembrana (PEAD)	0,00015	-
	Argila	0,45	Não inferior a 10^{-7}
Camada simples de argila (<i>Single Clay Liner</i>)	Camada de superfície	0,30	-
	Camada de drenagem	0,30	10^{-4} a 10^{-5}
	Argila	0,45	Não inferior a 10^{-7}
Camada simples de argila para semiárido (<i>Single Clay Liner</i>)	Blocos rochosos	0,05 a 0,10	-
	Camada de drenagem	0,30	10^{-4} a 10^{-5}
	Argila	0,45	Não inferior a 10^{-7}
Camada sintética (<i>Single Synthetic Liner</i>)	Camada de superfície	0,30	-
	Camada de drenagem	0,30	10^{-4} a 10^{-5}
	Geomembrana (PVC) ou	0,0007	-
	Geomembrana (PEAD)	0,00015	-
	Argila	0,45	Não inferior a 10^{-7}
Cobertura natural	Solo	0,60	Permeabilidade inferior à camada de solo de base

Fonte: Autor (2021) baseado em USEPA (2002); Huse (2007).

NOTA: PVC (Policloreto de vinila) e PEAD (Polietileno de alta densidade) são polímeros utilizados na fabricação do plástico e constituem as principais matérias-primas das geomembranas.

A Tabela 5, por fim, apresenta um resumo das especificações para camadas de cobertura de diversos países.

Tabela 5 – Especificações de sistemas de coberturas de diversos países.

País	Sistema de cobertura final	Espessura mínima da camada (m)
Austrália (Nova Gales do Sul)	Argila compactada	0,90
Austrália (Estado de Vitória)	Argila compactada	0,60
Áustria	Argila compactada + Geomembrana e geotêxtil protetivo	0,60 -
França	Argila do local + Geomembrana	5,00
Alemanha	Argila compactada + Geomembrana + Camada de Proteção + Barreira natural (geológica) ou solo compactado como subleito	0,75
Suécia	Argila compactada	1,00
Suiça	Argila compactada + Geomembrana ou Camada asfáltica	0,50 0,07
Reino Unido	Argila compactada + Geomembrana	1,50 0,002
África do Sul	Argila compactada + Camada de proteção	-
Japão	Solo de baixa permeabilidade; ou Mistura areia-cimento-bentonita; ou Camadas asfáltica; ou Geomembrana dupla	-
Canadá (Columbia)	Argila compactada	1,00 a 2,00
Canadá (Ontario)	Argila compactada + Geomembrana	0,75
Canadá (Quebec)	Solo de baixa permeabilidade; ou Argila compactada + Geomembrana dupla	0,60
Nova Zelândia	Solo de baixa permeabilidade; ou Argila compactada + Geomembrana	0,60
Estados Unidos	Argila compactada + geomembrana	0,60

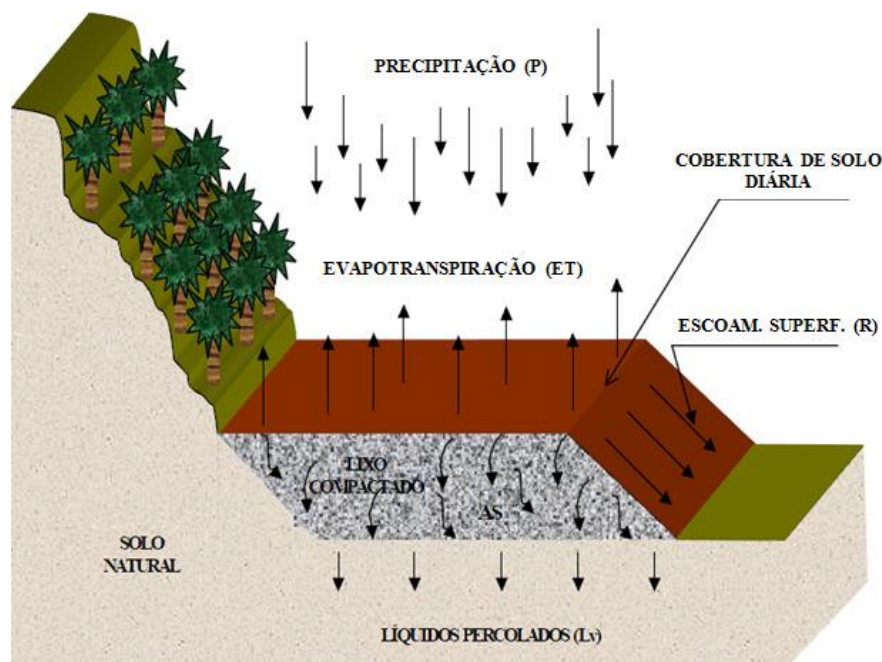
Fonte: Autor (2021) baseado em Manassero *et al.* (1998); Manassero *et al.* (2000); Bouazza e Van Impe (1998); Koerner, J. e Koerner, R. (1999).

2.2.3 Balanço hídrico de sistemas de coberturas secas

O entendimento do balanço hídrico e das alterações de seus componentes ao longo do tempo auxilia no monitoramento do desempenho dos sistemas de coberturas secas. O balanço hídrico é baseado na lei da conservação de massas e representa a soma de todas as quantidades de água adicionadas, subtraídas e retidas em um dado volume de solo durante um determinado período de tempo (HILLEL, 2003).

As parcelas componentes do balanço hídrico – precipitação (P), evapotranspiração (EVT), água armazenada no sistema (ΔW), escoamento superficial ou *runoff* (R) e percolação (PERC) – contribuem para o entendimento do fluxo de fluidos nas camadas de aterro (Figura 5). É possível, portanto, representar o balanço hídrico por meio da Equação 9.

Figura 5 – Balanço hídrico em um sistema de cobertura seca.



Fonte: Sobrinho (2000).

$$\text{PERC} = P - R - \text{EVT} - \Delta W \quad (9)$$

Simões *et al.* (2005) consideram que, para um entendimento adequado do balanço hídrico em camadas de cobertura, são necessárias informações relativas a registros meteorológicos (precipitação volumétrica, temperatura, radiação solar, umidade relativa, velocidade dos ventos), de propriedades dos resíduos dispostos (composição granulométrica e gravimétrica, teor de umidade, permeabilidade, capacidade de campo), de dados operacionais do sistema (histórico de enchimento do aterro, projeto de drenagem interno, vazões de

escoamento superficial, configurações dos sistemas de revestimento de fundo, dos sistemas de cobertura intermediários e final), de dados de monitoramento ambiental (volume de líquido lixiviado e gases extraídos) e de dados de monitoramento geotécnico.

Diversos são os fatores que influenciam diretamente o balanço hídrico, dentre os quais se destacam o teor de umidade dos resíduos sólidos e do material de cobertura do aterro, quantidade de água infiltrada no topo do aterro, consumida na formação de biogás e consumida na forma de vapor d'água, bem como a quantidade de água evaporada (SIMÕES *et al.*, 2005; RIOS, 2016).

Encontram-se, entretanto, conforme aponta Huse (2007), potenciais dificuldades na precisão do cálculo do balanço hídrico, especialmente devido a não homogeneidade dos resíduos, à distribuição desigual da quantidade de água na massa de resíduos, à existência de caminhos preferenciais da água dentro da massa de resíduos, à formação de camadas impermeáveis pelos próprios resíduos, à movimentação do gás que dificulta a percolação do lixiviado, a mudanças nas características biológicas dos resíduos devido aos processos de decomposição, além dos processos de disposição, compactação e cobertura do aterro.

2.2.4 Modelagens numéricas de sistemas cobertura secas

A utilização de modelagens numéricas auxilia na previsão e interpretação do comportamento do fluxo de água e do balanço hídrico de sistemas cobertura-rejeitos e os resultados das modelagens permitem avaliar a eficiência de cada tipo de cobertura. A confiabilidade da modelagem é condicionada principalmente à qualidade dos parâmetros de entrada, que devem ser representativos das condições reais dos materiais de campo.

Um modelo numérico simula um processo físico real, com a vantagem de produzir resultados rápidos quando comparados aos resultados obtidos em um modelo físico, que pode requerer meses ou anos para serem obtidos. O modelo numérico fornece informações por todo um perfil estudado, podendo ainda simular diferentes geometrias e condições de contorno (GEOSTUDIO, 2007).

Segundo O'Kane *et al.* (2002), a modelagem do balanço hídrico nos sistemas de coberturas consiste em três estágios: modelagem preliminar, detalhada e análise de sensibilidade. A modelagem preliminar é conduzida com a finalidade de se determinar quais as alternativas de sistema de cobertura possuem maior capacidade de limitar a percolação líquida

da chuva e o ingresso de oxigênio atmosférico para dentro do resíduo. Essa modelagem envolve a variação da espessura e o número das camadas dos materiais disponíveis na região sendo utilizados, em geral, condições climáticas médias e propriedades médias dos materiais.

A modelagem detalhada é realizada para o sistema de cobertura que se apresentou mais promissor na modelagem anterior. O comportamento de longo prazo desse sistema é avaliado através de uma análise estatística das condições climáticas anuais obtidas a partir dos registros das estações meteorológicas locais. Esse enfoque estatístico permite determinações mais confiáveis de períodos de chuva e seca prolongados (eventos extremos). A determinação da percolação líquida para cada ano registrado fornece a base necessária para o cálculo dos valores de percolação líquida para diferentes períodos de recorrência. Esses dados são então utilizados na modelagem do fluxo de água dentro da cobertura e do resíduo (SOUZA; BORMA; MENDONÇA, 2003).

A análise de sensibilidade referente às condições climáticas e às propriedades dos materiais é realizada para a alternativa de cobertura que se apresentou mais promissora. Nessa análise avalia-se o desempenho da cobertura frente aos eventos extremos (seca prolongada e chuva prolongada), às possíveis variações nas propriedades dos materiais e nas condições *in situ* dos materiais considerando alterações decorrente da ação de fatores biológicos, físicos e químicos, quando eventualmente sejam possíveis de quantificar (SOUZA; BORMA; MENDONÇA, 2003).

O processo de execução de modelagens numéricas pode ser dividido em três etapas básicas, segundo entendimento de Souza (2018): inserção dos dados de entrada, processamento e análise de resultados. As informações de entrada referem-se à geometria da estrutura, as curvas de retenção de água e de condutividade hidráulica não saturada e condições de contorno (climáticas, de vegetação, hidráulicas).

As condições de contorno são elementos essenciais para a resolução do modelo, pois definem a situação inicial dos materiais e quaisquer outras condições a que a cobertura esteja sujeita. Primeiramente, as condições iniciais de pressão e temperatura às quais os materiais estão submetidos devem ser definidas, assim como as condições de contorno climáticas (dados de precipitação, umidade relativa do ar, temperatura e velocidade do vento e evaporação potencial), de vegetação (índice de área foliar, umidade limite de planta e características de crescimento das raízes), hidráulicas, térmicas e de gás, a depender modelagem realizada. Define-se, ainda, a malha de elementos finitos (número de nós e geometria do elemento).

A situação-problema pode ser resolvida de forma estacionária (a partir da definição do instante inicial) ou transiente (dependente do tempo). Assim, pode-se obter os perfis de umidade, saturação e poropressões, fluxo de fluídos ao longo da profundidade e do tempo. É importante salientar que, após a execução da cobertura, o modelo numérico pode ser retroalimentado com os dados de monitoramento em campo, a fim de aperfeiçoá-lo.

Diversos estudos utilizaram-se de modelagens numéricas para previsão e avaliação do desempenho de sistemas cobertura-rejeito, considerando a condição não saturada dos perfis de solo (ROESLER; BENSON; ALBRIGHT, 2002; UBALDO, 2005; MENDONÇA, 2007; BORGHETTI SOARES *et al.*, 2009; 2010; 2013; SUN; YUEN; FOURIE, 2010; BORGHETTI SOARES, 2012; APIWANTRAGOON; BENSON; ALBRIGHT, 2014; SILVA, 2014; ZHANG; SUN, 2014; GONÇALVES, 2018; SOUZA, 2018; SOUZA *et al.*, 2019).

Segundo Albright; Benson e Waugh (2010), os principais *softwares* utilizados para modelagem numérica de sistemas de cobertura de rejeitos são LEACHM, HYDRUS, SVFLUX, UNSAT-H e VADOSE/W. Há, ainda, o modelo HELP, desenvolvido pela USEPA, entretanto Khire *et al.* (1997) e Roesler; Benson e Albright (2002) apontaram insuficiente acurácia dos processos hidrológicos aos quais estão submetidas as camadas de cobertura.

Nesse contexto, Ubaldo (2005) adotou o *software SoilCover* para estudar o desempenho de uma cobertura de rejeitos de mineração e Mendonça (2007) utilizou o mesmo *software* para o estudo da difusibilidade de oxigênio em coberturas. Borghetti Soares *et al.* (2009; 2010; 2013), Borghetti Soares (2012), Silva (2014), Souza (2018) e Souza *et al.* (2019) utilizaram o *software* VADOSE/W (GEOSTUDIO, 2007) para modelagem numérica de sistemas de coberturas secas aplicada a rejeito de mineração, apontando boa concordância entre os modelos numéricos e experimentais, mostrando-se útil na previsão do comportamento hídrico desses sistemas. Sun; Yuen e Fourie (2010) investigaram, através de modelagens numéricas auxiliadas pelos *softwares* SEEP/W e VADOSE/W, os efeitos da utilização de geotêxtil no desempenho de uma camada evapotranspirativa monolítica.

2.3 Interação solo-vegetação-atmosfera em sistemas de coberturas secas

O sistema solo-vegetação-atmosfera compreende uma série de processos complexos que se inter-relacionam com atributos físicos, químicos e biológicos do solo, da água, da planta e da atmosfera. As trocas entre a superfície terrestre e a atmosfera ocorrem ao longo dos ciclos

de, praticamente, todos os elementos biogeoquimicamente ativos, tais como água, carbono, nitrogênio, metano, compostos orgânicos voláteis, entre outros (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

Tem sido adotado, no contexto da engenharia geotécnica e da mecânica dos solos não saturados, a estrutura proposta por Wilson (1990), segundo a qual o movimento da água no sistema solo-vegetação-atmosfera pode ser visto como um sistema composto por três fases: interface solo-atmosfera, pela zona não saturada próxima à superfície e pela zona saturada, mais profunda.

Camapum de Carvalho *et al.* (2015) apontam três fatores interdependentes são importantes no entendimento desse fenômeno. O primeiro deles é o suprimento ou a demanda de água impostos pela atmosfera na interface solo-atmosfera, representadas pelas parcelas do balanço hídrico, em especial a precipitação, a infiltração de água de chuva e a evapotranspiração. O segundo fator refere-se à capacidade do solo de transmitir água, levando-se em conta as propriedades do solo e a influência do lençol freático como uma segunda fonte de suprimento de água no solo. O último fator está relacionado à influência da vegetação, uma vez que o tipo e densidade da vegetação afetam a evapotranspiração por meio do consumo de água pelas raízes das plantas, por sua influência nas taxas de escoamento superficial e pela retenção de água na superfície do terreno.

2.3.1 Influência da vegetação no desempenho de coberturas secas

A presença de vegetação constitui importante aspecto do balanço hídrico nas camadas de coberturas, visto que, por meio dela, grandes quantidades de água podem ser transferidas do solo para a atmosfera por meio do processo de evapotranspiração (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015) e o volume de percolação pode ser reduzido (NG *et al.*, 2019).

O uso de vegetação em coberturas de aterros de resíduos promove um sistema sustentável e ambientalmente correto. Segundo USEPA (2002), a vegetação possui várias funções em projetos de cobertura de aterros de resíduos, destacando-se, entre outras, a redução da energia da água e, conseqüentemente, do potencial erosivo, a partir da interceptação das chuvas pelas folhas das plantas; o auxílio na dissipação da energia dos ventos; o incremento da capacidade de armazenamento de água e o conforto visual e estético do ambiente.

USEPA (2002) indica alguns critérios para a escolha da vegetação mais apropriada:

- a) Vegetação localmente adaptadas, com baixo crescimento (inferior a 1 m de altura) e gramíneas nativas são recomendadas para manutenção da estabilidade ecológica em longo prazo;
- b) Adaptabilidade a condições de climas áridos, semiáridos e com temperaturas extremas;
- c) Possuir raízes com profundidade suficiente para promover a remoção da umidade da camada superficial, mas que não seja tão profunda a ponto de afetar as demais camadas de cobertura;
- d) A vegetação deve ser capaz de crescer com a mínima necessidade de adições de nutrientes;
- e) Deve-se imprimir uma diversidade de espécies vegetativas a fim de promover a proteção contra a erosão durante todas as estações do ano;
- f) A vegetação deve requerer baixa manutenção.

Verifica-se, entretanto, dificuldade de previsão, medição e obtenção de dados locais sobre a estrutura, densidade e profundidade das raízes, visto que a profundidade real das raízes é, usualmente, controlada pelas propriedades do solo e não somente pelo potencial da planta. Outro desafio para entendimento e controle da influência da vegetação nas camadas de cobertura é a diversidade de espécies vegetais que eventualmente podem se desenvolver. Santos e Matos (2017) identificaram 22 espécies distintas em uma célula encerrada de resíduos do Aterro Sanitário Oeste de Caucaia (ASMOC), com exemplares típicos de diferentes biomas, entre eles exemplares não previstos no Estudo de Impacto Ambiental.

Os autores atribuíram essa diversidade, entre outros fatores, ao tempo de encerramento da célula analisada e das conseqüentes transformações físicas, químicas e biológicas das massas de solo e resíduo; à presença de sementes derivadas dos resíduos sólidos domiciliares; de resíduos de poda, de raspagem e de capina, ao transporte de sementes pela ação de animais, dos ventos e das chuvas.

Alguns estudos destacam a influência da vegetação no desempenho de sistemas de coberturas secas. Ng *et al.* (2019) estudaram a influência da vegetação em um sistema de cobertura composta por três camadas – camada superior e intermediária constituída de granito peneirado e resíduo de construção civil (espessura de 0,6 e 0,4 m, respectivamente) e camada inferior constituída de granito completamente decomposto (espessura de 0,8 m) – sem a

utilização de geomembrana e com vegetação sobrejacente (*Cynodon dactylon* – grama Bermuda) no aterro de Shenzhen Xiaping, em uma localidade de clima úmido da China.

Para essa condição, em que a precipitação anual média foi de cerca de 2950 mm, a cobertura do aterro de três camadas coberta por vegetação apresentou maior capacidade de armazenamento de água em comparação com a cobertura do aterro de três camadas sem vegetação (que variou de 311 a 420 mm). Atribui-se esse comportamento à presença de raízes no solo, o que leva a um aumento na capacidade de retenção de água. Ao final do monitoramento, observou-se, ainda, que a presença da vegetação reduziu a percolação em 26%.

Barnswell e Dwyer (2012) estudaram, pelo período de dois anos, em uma região de clima úmido (noroeste de Ohio, Estados Unidos), coberturas evapotranspirativas com a utilização de solo argiloso composto por sedimento dragado, lodo de esgoto e de cal, revestidas por dois tipos de vegetação: não madura (recentemente plantada) e madura (retirada de uma pradaria restaurada de grama alta com mais de dez anos de idade). Os sistemas de cobertura foram submetidos a taxas de 94 e 69 cm/ano de precipitação no primeiro e segundo ano analisados, respectivamente.

Os autores verificaram que a maturidade da vegetação influencia no desempenho das coberturas, uma vez que no primeiro ano, o sistema com plantas maduras apresentou menor percolação que o sistema de plantas não maduras, enquanto que no segundo ano de análise as plantas maduras produziram maior percolação em relação às não maduras.

2.3.2 Evapotranspiração

Evapotranspiração é o fenômeno combinado de evaporação e de transpiração das plantas pelo qual a água é transformada do estado líquido para o gasoso. Esse fenômeno inclui a evaporação da água contida no solo, do orvalho, da parcela da precipitação interceptada e retida, bem como a transpiração das plantas. A evapotranspiração depende de inúmeros fatores, como radiação solar, temperatura, umidade do solo e do ar, velocidade do vento e características do solo e das plantas.

A evapotranspiração pode ser compreendida sob duas perspectivas: potencial e real. Evapotranspiração potencial é quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, em determinada unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente

coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água. Evapotranspiração real, por sua vez, refere-se à quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo. A evapotranspiração real é igual ou menor que a evapotranspiração potencial (ALLEN *et al.*, 1998).

A transpiração, por sua vez, pode ser compreendida como um processo biofísico natural do desenvolvimento das plantas, por meio do qual as raízes absorvem a água e transportam os nutrientes necessários para o metabolismo vegetal através do caule, liberando água pelas folhas através dos estômatos, que são aberturas microscópicas localizadas na parte superior das folhas, cuja principal função é regular as trocas de água, energia e nutrientes com a atmosfera. (ALLEN *et al.*, 1998).

Camapum de Carvalho *et al.* (2015) esclarecem que, em termos de medidas *in situ*, a determinação da taxa de evaporação potencial é feita, em geral, pela panela de evaporação (ou tanque Classe A), em que o cálculo da evaporação é feito por medidas da variação da altura de água dentro do tanque. As medidas de evaporação real, por sua vez, são feitas pelos lisímetros, uma espécie de modelo reduzido do sistema solo-planta-atmosfera e destinam-se a quantificar as trocas de água que ocorrem entre a atmosfera e o solo.

As medidas de transpiração podem ser feitas diretamente em plantas por medidores de fluxos de seiva (*sap flow meters*) ou dendrômetros de alta precisão, medidores colocados nos troncos das árvores e que visam quantificar a taxa de fluxo de água no interior de uma determinada árvore ou em indivíduos de cada espécie (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015). Devido ao fato de que as medidas *in situ* são altamente específicas para o local em que são realizados os experimentos e seu uso é de difícil generalização, verificam-se diversos métodos indiretos para a determinação da evaporação real e potencial (Tabela 6).

Tabela 6.1 – Métodos indiretos de determinação da evaporação.

Autor (ano)	Equação
Thorntwaite (1948)	$EP = 0,533 \left(\frac{L_d}{12} \right) \left(\frac{N}{30} \right) \left(\frac{10T_a}{I} \right)^{a_t}$ $I = \sum_{\text{mês inicial}=1}^{12} \left(\frac{T_a}{5} \right)^{1,514}$ $a_t = (6,75 \times 10^{-7})I^3 - (7,71 \times 10^{-5})I^2 + (1,79 \times 10^{-2})I + 0,492$

Tabela 6.2 – Métodos indiretos de determinação da evaporação (continuação).

Autor (ano)	Equação
Penman (1948)	$EP = \frac{\Gamma Q_n + \eta E_a}{\Gamma + \eta}$
	$E_a = (1 + 0,146W_w)(u_{v0}^{ar} - u_v^{ar})$
Blaney e Criddle (1950)	$EP = p(0,46T_{m\acute{e}dia} + 8)$
	$T_{m\acute{e}dia} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$
Priestley-Taylor (1972)	$EP = \alpha_3 \frac{\Gamma}{\Gamma + \eta} (Q_n - G)$
Penman-Monteith Monteith (1980)	$EP = \frac{(\Gamma R_n - G) + \rho_a C_a (u_{v0}^{ar} - u_v^{ar}) g_a}{\left[\Gamma + \eta \left(1 + \frac{g_s}{g_a} \right) L \rho_w \right]} (86,4 \times 10^6)$
Penman-Wilson Wilson (1990)	$ER = \frac{\Gamma Q_n + \eta E_a}{\Gamma + \frac{\eta}{h_s}}$
	$E_a = [2,625(1 + 0,146W_w)] u_v^{ar} \left(\frac{1}{h_a} - \frac{1}{h_s} \right)$

Fonte: Autor (2020).

Em que:

EP – Evaporação potencial (mm/dia);

ER – evaporação real;

N – Número de dias no mês;

L_d – Fotoperíodo, duração da luz do dia (h);T_a – Temperatura média mensal do ar (°C);I – Somatório em função T_a;a_t – Função da variável I;

Γ – Inclinação da curva de curva de pressão parcial de saturação do vapor d'água, em função da temperatura do ar (kPa/°C);

Q_n – saldo de radiação na superfície do solo saturado ou superfície de água (mm/dia);

η – constante psicrométrica ou taxa de conversão de calor sensível em calor latente (kPa/°C);

E_a – (mm/dia);W_w – velocidade do vento (km/h);

L – calor latente de vaporização ou energia necessário para evaporar uma massa unitária de água (ou seja, $2,42 \times 10^6$ J/kg);
 R_n – saldo de radiação ($J/m^2/dia$), proveniente de fonte de energia externa;
 G – fluxo de calor no solo ($J/m^2/dia$);
 C_a – capacidade térmica específica do ar, ($MJ/kg/^\circ C$);
 ρ_a – densidade do ar seco (kg/m^3);
 ρ_w – densidade da água, (kg/m^3);
 g_a – condutância atmosférica (m/s);
 g_s – condutância da superfície (m/s);
 $86,4 \times 10^6$ – conversão de m/s para mm/dia;
 α_3 – constante para superfícies abertas e bem molhadas (1,26);
 h_s – umidade relativa do solo;
 h_a – umidade relativa do ar;
 u_v^{ar} – pressão de vapor real do ar em uma altura de referência (kPa);
 u_{v0}^{ar} – pressão de vapor no ar acima da superfície de água (ou solo saturado) (kPa);

2.3.3 Índice de Área Foliar

O Índice de Área Foliar (IAF), por definição, é compreendido como a área total da face das folhas por unidade de área da sombra da copa projetada, de forma perpendicular, na superfície do solo (WATSON, 1947; ASNER; SCURLOCK; HICKE, 2003). O IAF é, portanto, uma medida adimensional (também podendo ser expressa em m^2/m^2).

O IAF é uma variável biofísica que tem influência sobre vários processos superficiais, tais como fotossíntese, transpiração, evaporação e balanço de radiação da superfície, por isso é um dos mais importantes parâmetros de entrada de modelos numéricos que representem a interação solo-vegetação-atmosfera, sendo de difícil estimativa devido a sua variabilidade espacial e temporal (BREDA, 2003; WANG *et al.*, 2005; ISHIHARA; HIURA, 2011; YAN *et al.*, 2012). Qdais; Abdulla e Qrenawi (2008) apontam, ainda, que o IAF é um dos parâmetros que mais afetam a produção de lixiviado em regiões áridas.

O IAF representa o efeito da cobertura vegetal na energia disponível para extrair água da superfície do solo, sendo o maior controlador da transpiração das plantas. Uma cobertura vegetal com uma IAF grande tem um potencial maior de extrair água. A área foliar é fundamental na absorção da radiação solar e na realização de fotossíntese durante o período diurno e em ciclos sazonais. (FREDLUND *et al.*, 2012).

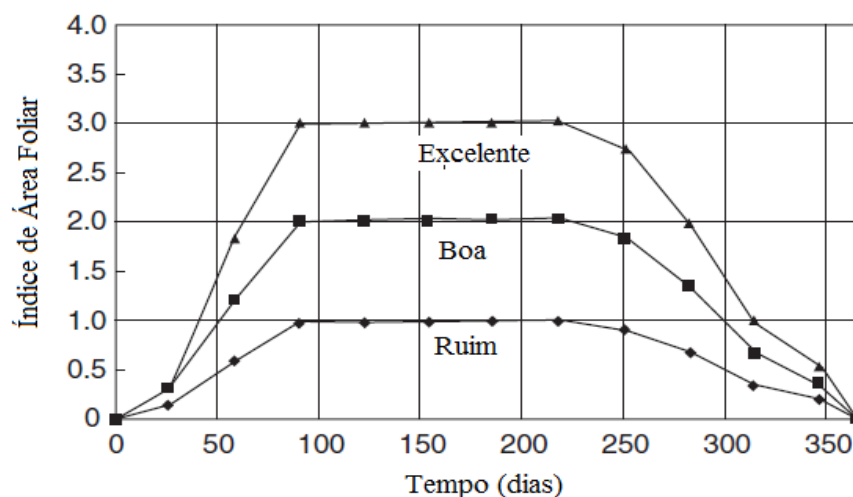
Observa-se uma variação de Índice de Área Foliar entre zero (condição em que não há superfície foliar) e dez. Durante o período de crescimento vegetativo, por exemplo, o IAF pode ter inicialmente valor nulo, atingir um valor máximo e decrescer, eventualmente, até zero. Com crescimento da área foliar, as plantas aumentam a utilização da água e, em geral, espécies com maior taxa de crescimento em termos de biomassa têm maior quantidade de folhas, normalmente mais finas, elevando, conseqüentemente, os valores de IAF, implicando maiores taxas de evapotranspiração (FREDLUND *et al.*, 2012).

Garg *et al.* (2015) estudaram os processos de evapotranspiração, evaporação e transpiração de um sistema solo-vegetação (espécie *Schefflera heptaphylla*) a partir da variação do IAF. O aumento do IAF (de 2,3 para 4,6) foi responsável por aumentos significativos no volume de transpiração e evapotranspiração. A evaporação, por sua vez, teve menor influência na indução de sucção.

Ng *et al.* (2016) identificaram que o espaçamento da vegetação influencia o IAF da cobertura vegetal. Neste estudo, os autores verificaram que a diminuição do espaçamento de plantio de 180 mm para 60 mm das mudas de *Schefflera heptaphylla* reduziu o IAF de 1,35 para 0,96. Atribuiu-se tal comportamento ao aumento da competição entre as plantas vizinhas pela umidade do solo, uma vez que o teor de umidade volumétrico do solo foi reduzido com a redução do espaçamento entre as mudas.

Tratch (1996) indica três condições típicas de qualidades de coberturas vegetal em função do IAF ao longo do tempo: excelente (IAF máximo de 3), boa (IAF máximo de 2) e ruim (IAF máximo de 1) (Figura 6).

Figura 6 – Qualidade das coberturas das plantas em função do Índice de Área Foliar.



Fonte: Adaptado de Fredlund *et al.* (2012).

Para a determinação da área foliar, podem ser utilizados métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos utilizam medidas realizadas diretamente nas folhas, mas é uma amostragem destrutiva e dispendiosa (CARUZZO; ROCHA, 2000). Roberts *et al.* (1996) identificaram que métodos indiretos que realizam estimativa do IAF a partir de informações da planta apresentam uma forma muito mais prática de obtenção dos dados.

Breda (2003) e Jonckheere *et al.* (2004) apresentam uma revisão dos muitos métodos indiretos que podem ser utilizados para estimar o IAF, como os métodos por contato (halométrico) e sem contato (ceptômetro, DEMON, LAI-2000, TRAC), destacando que a aplicação de cada método depende de vários fatores como nível de precisão exigido, possibilidade de destruição da planta e tipo de planta (herbácea, arbustiva ou arbórea).

2.3.4 Umidade Limite da Planta

Para o entendimento da Umidade Limite da Planta (FREDLUND *et al.*, 2012), denominada também de Índice de Umidade do Solo (BETTS, 2004), parâmetro necessário para modelagens de sistemas solo-vegetação-atmosfera, pode ser definido em função da capacidade de campo (θ_{CP}) e do ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), conforme Equação 10.

$$ULP = \frac{\theta - \theta_{PMP}}{\theta_{CP} - \theta_{PMP}} \quad (10)$$

A capacidade de campo refere-se ao teor de umidade no qual ocorre transição das forças atuantes no movimento da água no solo, passando das forças gravitacionais (solo na condição saturada) para as forças de sucção (solo na condição não saturada). O ponto de murcha permanente, por sua vez, refere-se ao teor de umidade no qual a planta não consegue mais absorver a água do solo.

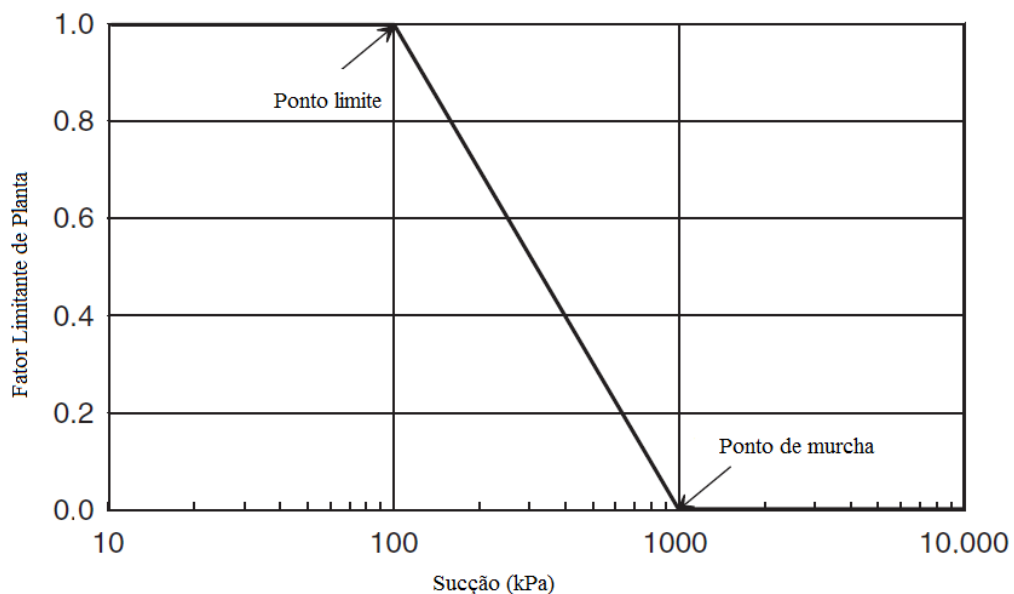
Dessa forma, a água de fato disponível para as plantas realizarem os fenômenos da transpiração e da fotossíntese é obtida pela diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Acima da capacidade de campo, a água não pode ser mantida nos poros do solo devido à ação da gravidade, enquanto abaixo do ponto de murcha permanente a água está tão fortemente aderida às partículas sólidas do solo que não é acessível para as plantas (HILLEL, 1998; CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

O parâmetro Umidade Limite da Planta varia entre 0 e 1 e é uma medida do teor de umidade que está disponível para as plantas. Nas circunstâncias em que o solo se encontra acima

da capacidade de campo (como após fortes eventos de chuva ou em áreas saturadas ao longo do curso dos rios), o valor de UML é admitido como sendo 1. À medida que a umidade do solo (θ) tende ao ponto de murcha permanente, a UML tende a zero (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

Fredlund *et al.* (2012) apresentaram uma curva típica que relaciona ULM e a sucção do solo (Figura 7). Apesar de serem valores muito generalizados para a ampla gama de tipos de solo e tipos de vegetação que ocorrem na natureza, esses conceitos têm sido extensivamente utilizados na modelagem do sistema solo-planta-atmosfera para relacionar a taxa de transpiração ao teor de umidade do solo e ao potencial de água no solo (HILLEL, 1998; DINGMAN, 2008; CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

Figura 7 – Umidade Limite de Plantas *versus* sucção do solo.



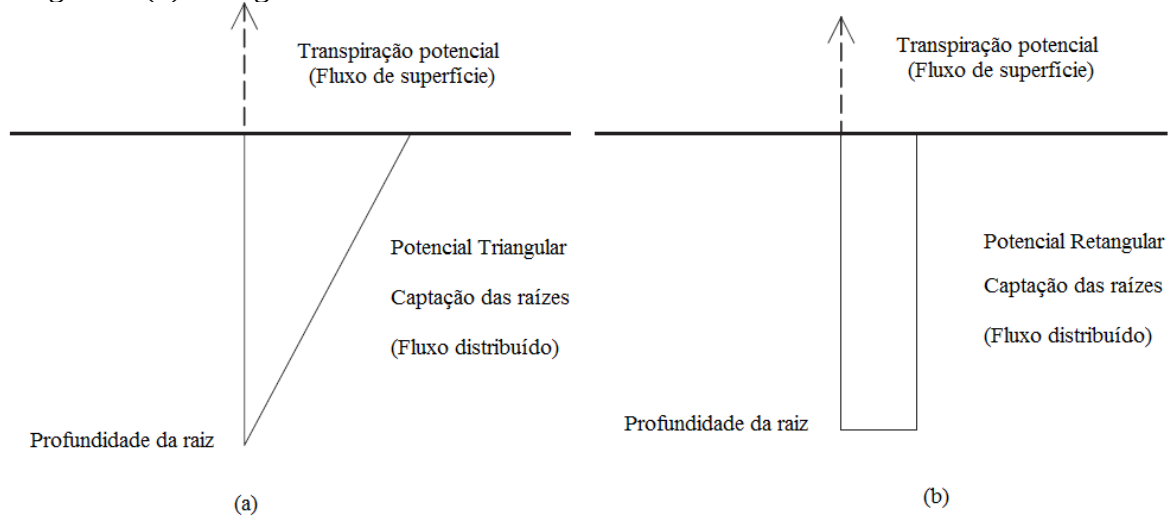
Fonte: Adaptado de Fredlund *et al.* (2012).

2.3.5 Perfil de Zona Radicular

O perfil de zona radicular refere-se às características de profundidade e distribuição das raízes. Duas funções explicam as zonas radiculares: triangular e retangular (FREDLUND *et al.*, 2012). Ambas as funções extraem o mesmo volume de água do solo, mas a água é extraída de maneira diferente em relação à profundidade. A função de forma de distribuição de raiz triangular descreve uma captação decrescente da água com profundidade, enquanto a função de forma retangular de distribuição radicular descreve uma captação constante da água com profundidade (Figura 8a e 8b).

Amorim (2008) estudou o tamanho das raízes de espécies brasileiras germinadas em experimento de coberturas de resíduos, constatando profundidades entre 30 e 40 cm.

Figura 8 – Formas das funções representativas das captações radiculares potenciais: (a) triangular e (b) retangular.



Fonte: Adaptado de Fredlund *et al.* (2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta dissertação propõe-se analisar o desempenho de diferentes configurações de sistemas de coberturas secas, considerando a influência da vegetação, por meio de modelagens numéricas. Nesse intuito, a pesquisa tem como base a execução das seguintes etapas:

- a) Realização de uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos e conceitos referentes à temática, destacando-se, entre outros, os conhecimentos acerca de fluxo de água em meios não saturados, de configurações e classificações de camadas de cobertura secas de aterros de resíduos, os processos de interação solo-vegetação-atmosfera e a influência da vegetação no desempenho de sistemas de coberturas secas;
- b) Escolha da configuração das camadas de cobertura a serem modeladas;
- c) Coleta de dados meteorológicos, em banco de dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), quanto às condições de contorno climáticas, a saber: precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e evaporação potencial;
- d) Seleção das condições climáticas para a modelagem numérica – condição de máxima, média e mínima precipitação anual, considerando o período de 20 anos (2000 a 2019), na localidade de Fortaleza, Ceará, limítrofe ao município de Caucaia, onde se localiza o ASMOC;
- e) Uso do *software* de modelagem VADOSE/W (GEOSTUDIO, 2007) para realização das modelagens numéricas;

3.1 Modelagem numérica com o *software* VADOSE/W

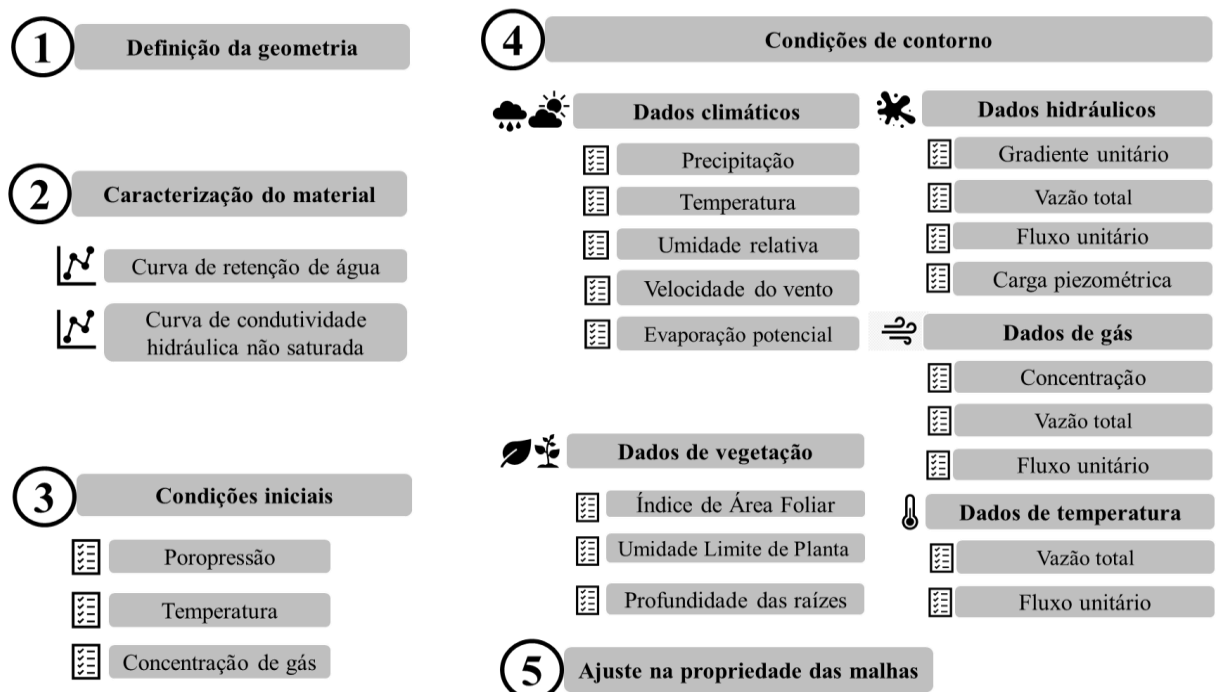
O VADOSE/W é um *software* bidimensional que utiliza a solução de Darcy para simular o transporte de água, de calor, o fluxo evapotranspirativo e o balanço hídrico através de meios saturados e não saturados a partir da aplicação do método dos elementos finitos. As análises permitem o entendimento do fluxo de fluidos de sistemas cobertura-rejeito considerando o processo de absorção de água pelas raízes de plantas, de evaporação e de transpiração, o índice de área foliar, as tensões provenientes da interação solo-vegetação, a profundidade e a distribuição de raízes, bem como possibilita a análise dos componentes do balanço hídrico da camada de cobertura.

A aplicação do método dos elementos finitos consiste, basicamente, segundo Reddy (2006), em dividir o domínio do problema em uma coleção de subdomínios, sendo cada subdomínio representado por um conjunto de equações que são elementos do problema original, e, em seguida, recombinar sistematicamente todos os conjuntos de equações do elemento num sistema global de equações para o cálculo final. O sistema global de equações tem técnicas de solução conhecidas, e pode ser calculado desde os valores iniciais do problema original, para obter uma resposta numérica.

Neste estudo, foram definidas a geometria dos perfis de cobertura, as características hidráulicas dos materiais (curvas de retenção de água e de condutividade hidráulica não saturada, poropressão e temperaturas iniciais), as condições de malha (tamanho e formato do elemento, o que define o número de nós), as condições de contorno climáticas (precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, velocidades dos ventos e evapotranspiração potencial), as condições de contorno hidráulicas (gradiente unitário) e as condições de contorno de vegetação (IAF, umidade limite da planta e perfil de zona radicular).

Ademais, há possibilidade de realizar simulações numéricas que envolvam fluxo de gás e de temperatura, a partir da definição dos parâmetros específicos dessas análises, como condutividade térmica, capacidade volumétrica de calor e difusão, decomposição e dissolução do gás. A Figura 9 apresenta o processo simplificado de modelagem no *software* VADOSE/W.

Figura 9 – Processo simplificado de modelagem numérica no *software* VADOSE/W.



O *software* permite análises dos tipos estacionária e transiente. Em uma análise de estado estacionário, atribui-se pressão constante ou taxa de fluxo constante. A análise transiente, por sua vez, tem como premissa a alteração das condições de contorno ao longo do tempo, a partir do estabelecimento de uma condição inicial. A análise realizada nesta pesquisa é do tipo transiente acoplada, em que há a modelagem considerando as diferentes condições de contorno (climáticas, hidráulicas e de vegetação).

O VADOSE/W utiliza a solução de Penman-Wilson (WILSON, 1990) para o cálculo do fluxo evaporativo do solo quando simuladas condições de interação solo-planta-atmosfera (ver Tabela 6). O valor encontrado é, então, modificado pela Equação 11, de forma que uma parte da energia disponível seja dividida entre as plantas. O valor de evaporação modificado (ER_{mod}) é definido igual a zero se o Índice de Área Foliar for maior que 2,7 e é definido para seu valor total se o for menor que 0,1 (TRATCH, 1996).

$$ER_{mod} = ER\{1 - (-0,21 + 0,7\sqrt{IAF})\} \quad (11)$$

O VADOSE permite determinar a contribuição da transpiração potencial (TP), sendo seu valor relacionado à evaporação potencial (EP) e será igual ao valor da evaporação potencial se o IAF for maior que 2,7. O cálculo da transpiração potencial é de acordo com a Equação 12.

$$TP = EP(-0,21 + 0,7\sqrt{IAF}) \quad (12)$$

O valor da transpiração potencial é referente à energia que agora está disponível para a planta. Se o solo estiver saturado, a quantidade total dessa energia será aplicada às raízes de acordo com as funções de profundidade (R_n) e espessura (R_t) e formato da zona radicular. Entretanto, se o solo estiver parcialmente saturado, o valor de transpiração real (TR) é ainda mais reduzido, de acordo com a função de Umidade Limite de Planta inserida no *software*, conforme Equação 13.

$$TR = ULP \times \frac{2TP}{R_t} \left(1 - \frac{R_n}{R_t}\right) A_n \quad (13)$$

Em que:

A_n – Área de contribuição do nó analisado.

3.2 Caracterização do material, geometria, definição da malha de elementos finitos e condições de contorno iniciais

Foram propostas três diferentes configurações de coberturas secas, a saber:

- a) Perfil A: Camada de areia argilosa (espessura de 0,4 m) sobrejacente a uma camada de resíduo (espessura de 1,0 m);
- b) Perfil B: Camada superficial (*Top soil*) de solo arenoso (espessura de 0,3 m), sobrejacente a uma camada de argila (espessura de 0,3 m) e a uma camada de resíduo (espessura de 1,0 m);
- c) Perfil C: Camada superficial (*Top soil*) de solo arenoso (espessura de 0,3 m), sobrejacente a uma camada de solo granular para drenagem (espessura de 0,3 m), a uma camada de argila (espessura de 0,3 m) e a uma camada de resíduo (espessura de 1,0 m).

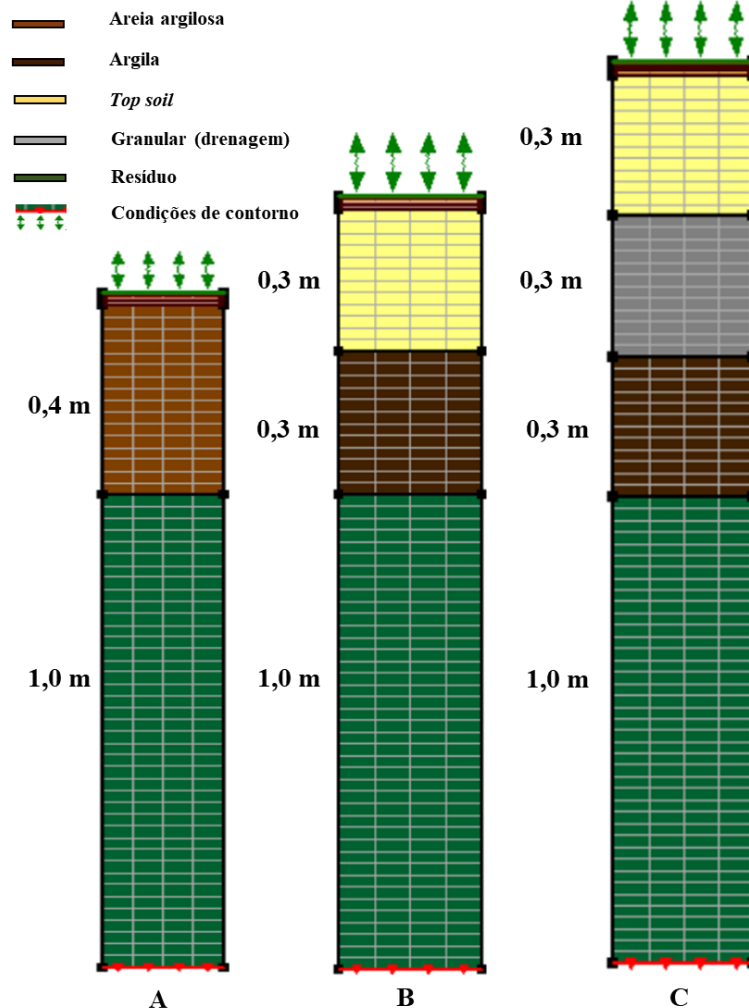
O perfil A tem configuração similar à observada no Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia, em que há a presença de uma única camada de solo que desempenha a função de barreira impermeabilizante e de suporte à vegetação. O perfil B é composto por uma barreira impermeabilizante e uma camada de revestimento e suporte à vegetação. O perfil C tem configuração similar à *Single Clay Liner* (USEPA, 2002) e representa o perfil B com a adição de uma camada de solo granular, visando atribuir um comportamento drenante entre as camadas de argila e revestimento superficial (*Top soil*).

Nos modelos numéricos analisados, cada material (cobertura ou rejeito) foi inserido dentro de uma região na geometria do perfil, na qual foi definida uma malha de elementos finitos. O desenho das malhas foi adotado considerando a minimização do erro de convergência da solução e a redução do tempo de processamento. Tomou-se como base o estudo de Souza (2018), que, utilizando-se do mesmo *software*, adotou malha constituída de elementos quadrados de 0,05 m, encontrando satisfatória convergência e erro. Este trabalho adotou, portanto, elementos quadrados de 0,025 m de lado, distribuídos igualmente sobre toda a geometria, totalizando 315 nós e 248 elementos para o perfil A, 355 nós e 280 elementos para o perfil B e 415 nós e 328 elementos para o perfil C (Figura 10).

Além disso, foi necessária a adoção de três camadas de elementos de superfície, que estão sujeitos às condições climáticas, com 0,010 m de espessura cada. Esses elementos têm como função discretizar a malha de elementos finitos na superfície da cobertura, a fim de tornar

numericamente possível a avaliação de possíveis variações drásticas nas condições climáticas (GEOSTUDIO, 2007).

Figura 10 - Geometria e definição da malha de elementos finitos.



Fonte: Autor (2021).

Os materiais adotados nesta pesquisa foram selecionados a partir de levantamento bibliográfico. Aos materiais areia argilosa (ASMOC) (ELIAS, 2018), argila (MAGALHÃES, 2019), *Top soil* (ALMEIDA, 2011), granular (drenagem) (AMORIM, 2008) e resíduo (SHI *et al.*, 2018) foram atribuídas as curvas de retenção de água (Figura 11) e de condutividade hidráulica não saturada (Figura 12), ajustadas a partir dos métodos de Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) no próprio *software*, considerando a condutividade hidráulica na condição saturada (Tabela 7).

Foram estabelecidas, ainda, as condições iniciais de poropressão (Tabela 7), considerando uma condição de compactação das camadas abaixo da umidade ótima, visto que os processos e equipamentos de compactação em aterros de resíduos são, por vezes,

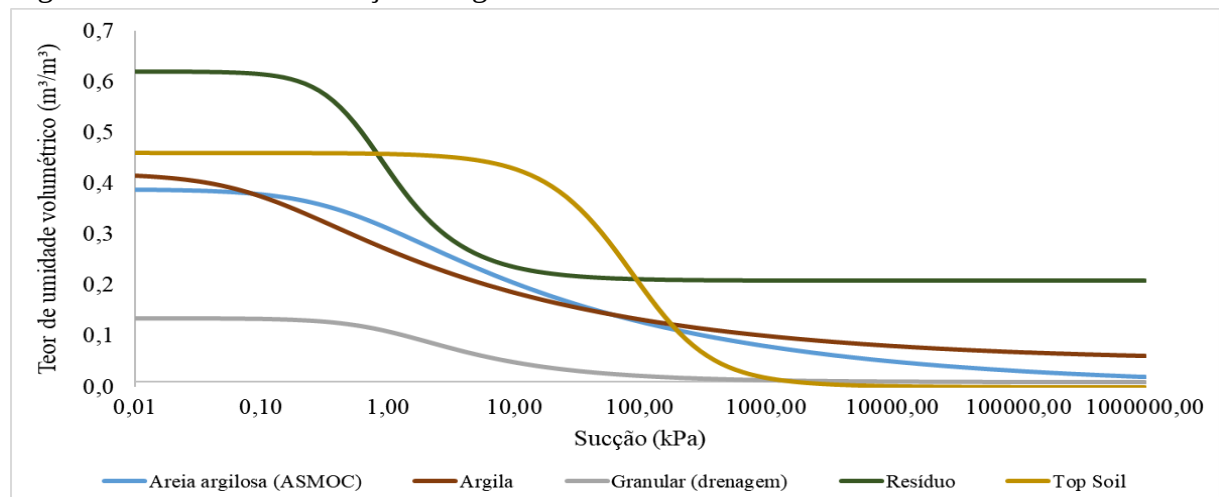
insuficientes. Oliveira (2011), por exemplo, indicou que, durante a execução da camada de cobertura do ASMOC, não ocorreu o devido controle do grau de compactação do solo, resultando em amostras de solo da cobertura do aterro com permeabilidade favorável à fuga de gases e à entrada de água pluvial na massa de resíduos.

Tabela 7 – Condições iniciais e de ajuste das curvas de retenção e de condutividade hidráulica.

Material	Método	a	m	n	θ_s (m ³ /m ³)	θ_r (m ³ /m ³)	θ_0 (m ³ /m ³)	Ψ_0 (kPa)	k_{sat} (m/s)
Areia argilosa (ASMOC)	Van Genuchten (1980)	0,44	0,17	1,21	0,39	0,00	0,10	400	$6,7 \times 10^{-7}$
Argila		0,09	0,18	1,21	0,42	0,05	0,10	1000	$2,9 \times 10^{-9}$
Drenagem (granular)		1,00	0,33	1,50	0,14	0,01	0,08	3	$7,5 \times 10^{-5}$
Resíduo		0,62	0,49	1,98	0,62	0,21	0,43	1	$2,5 \times 10^{-5}$
Top soil	Fredlund e Xing (1994)	96,10	2,90	1,20	0,46	0,00	0,20	100	$1,5 \times 10^{-5}$

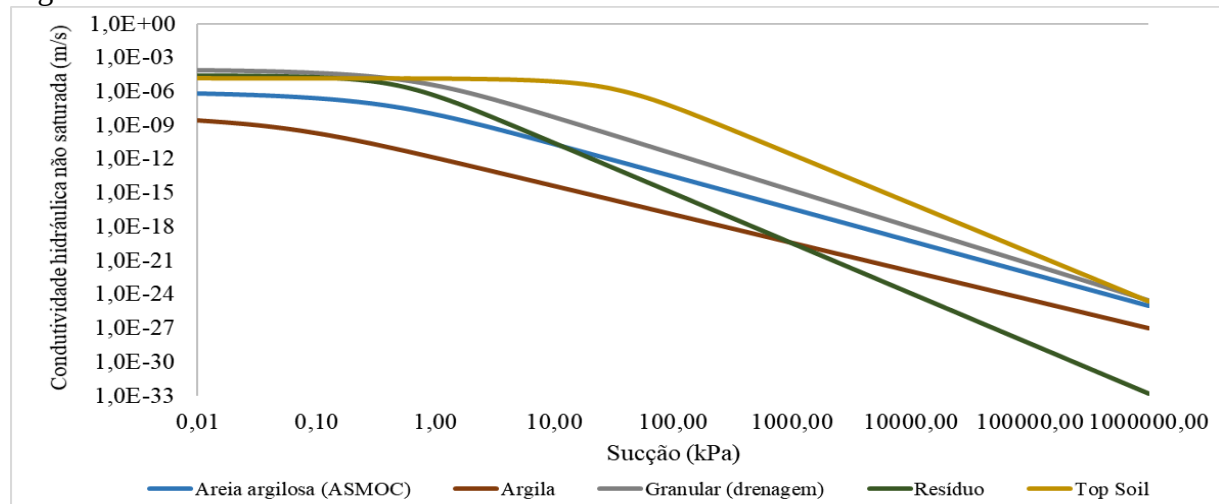
Fonte: Autor (2021).

Figura 11 – Curvas de retenção de água dos materiais.



Fonte: Autor (2021).

Figura 12 – Curvas de condutividade hidráulica não saturada dos materiais.

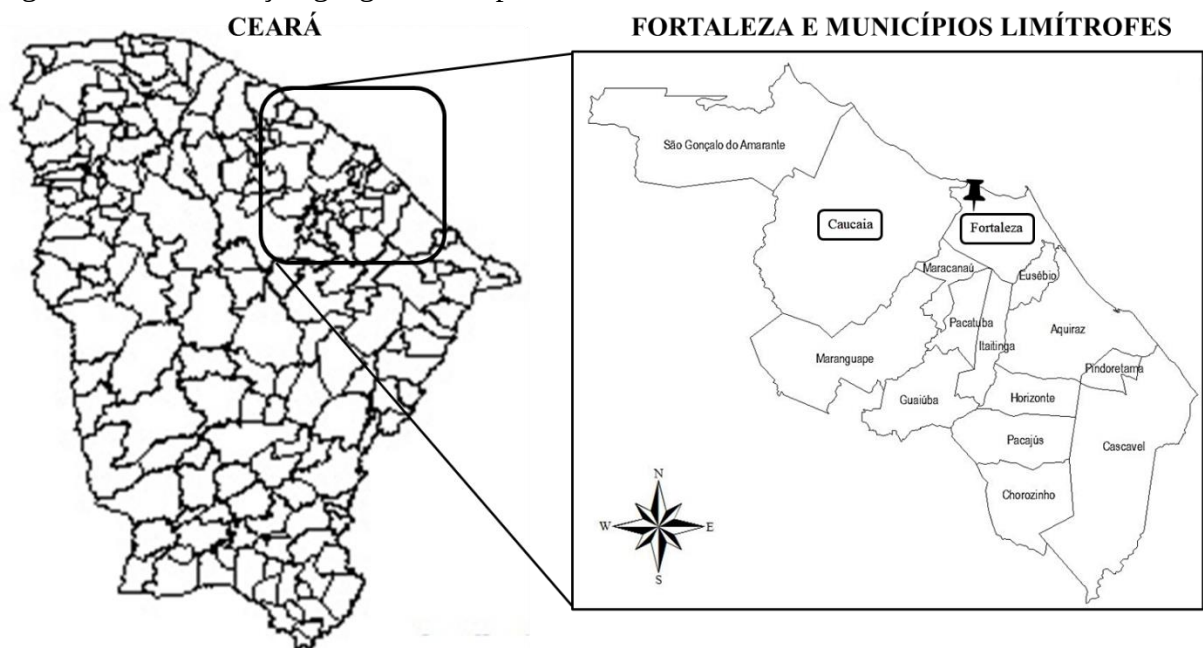


Fonte: Autor (2021).

3.3 Condições de contorno climáticas

Para realização das modelagens numéricas, foram estabelecidas três condições de precipitação anual: máxima, média e mínima, considerando o período de 20 anos (2000 a 2019), referente à localidade de Fortaleza, no Estado do Ceará, região Nordeste do Brasil (Figura 13), proveniente da Estação Convencional 82397, fornecida pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos do Ceará (FUNCEME) e pelo Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET).

Figura 13 – Localização geográfica do ponto de coleta de dados climáticos.



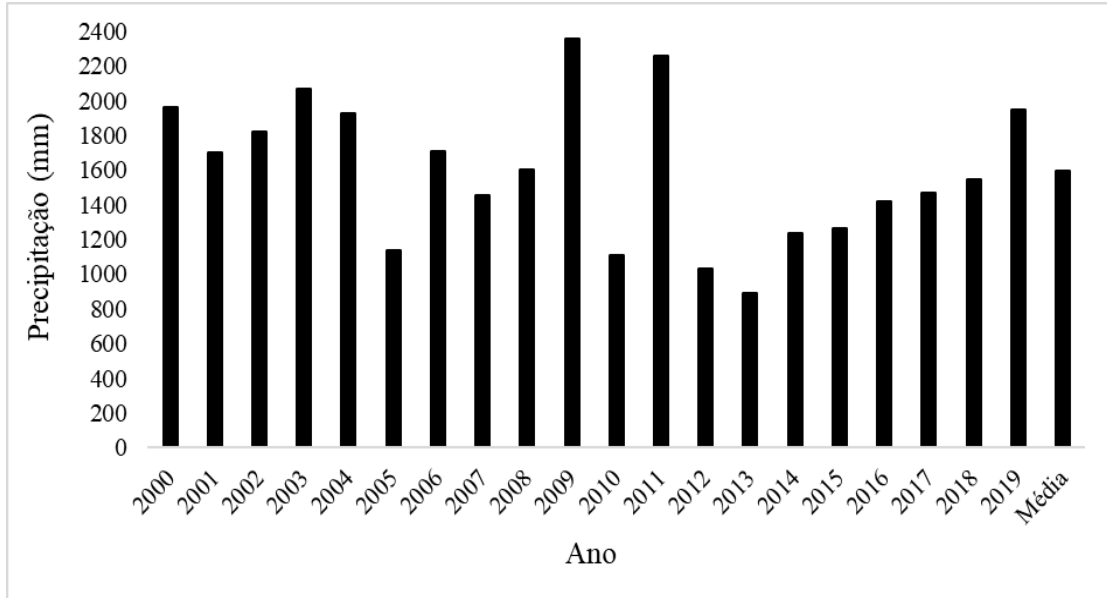
Fonte: Autor (2021).

A caracterização climática do município de Fortaleza deve-se ao fato de ser limítrofe ao município de Caucaia e, para este, não haver disponibilidade de dados climáticos suficientes para análise. Ademais, a localidade apresenta singularidades geoclimáticas, por ter influência de condições de semiárido e de clima subúmido úmido, apresentando índice de aridez de 97,32 (FUNCEME, 2017).

Considerando as precipitações do período de 20 anos analisado (Figura 14), o ano com a precipitação máxima foi 2009, com volume acumulado de 2359,5 mm. O ano de precipitação mínima foi 2013, com 887,9 mm precipitados. O ano de precipitação média anual no período estudado foi 2008, com 1602,3mm (Figura 15). A adoção das situações de precipitação máxima e mínima justifica-se devido à importância de se verificar a variação do desempenho do sistema

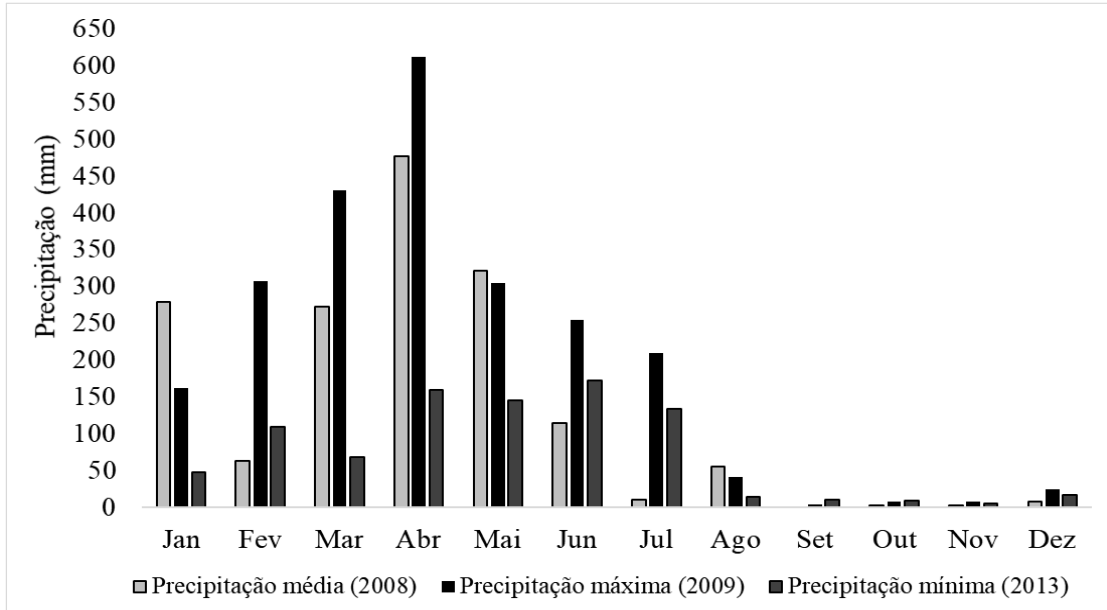
rejeito-cobertura em situações que o volume de precipitação apresenta discrepância em relação à média histórica.

Figura 14 – Precipitação anual do período 2000-2019.



Fonte: FUNCEME (2020).

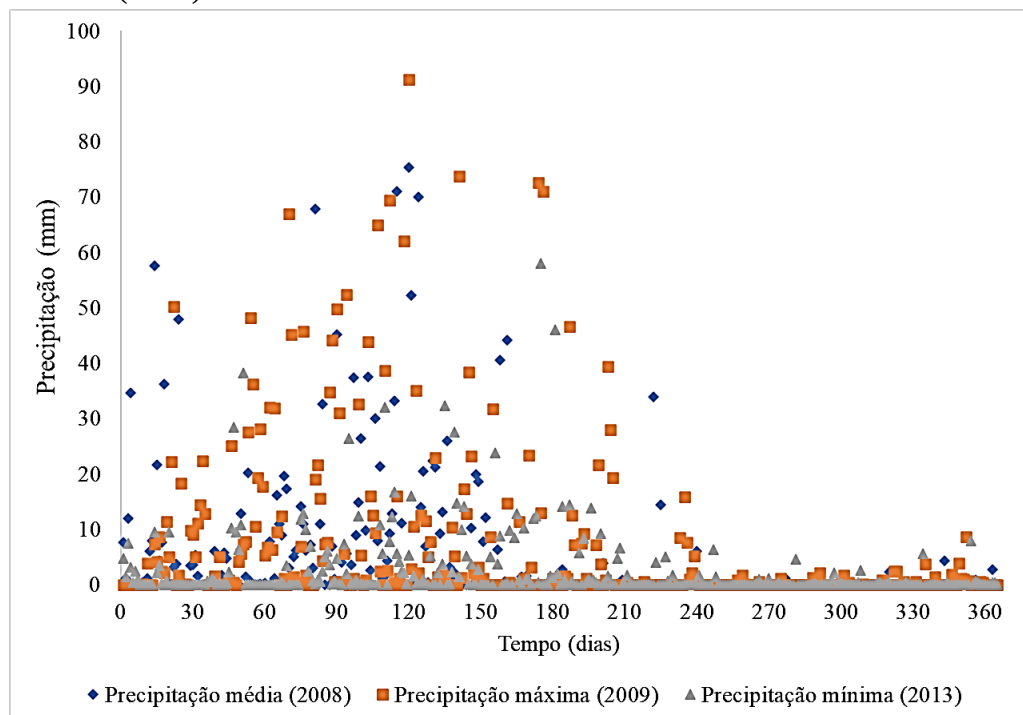
Figura 15 – Precipitação mensal para os anos de máxima, média e mínima precipitação.



Fonte: FUNCEME (2020).

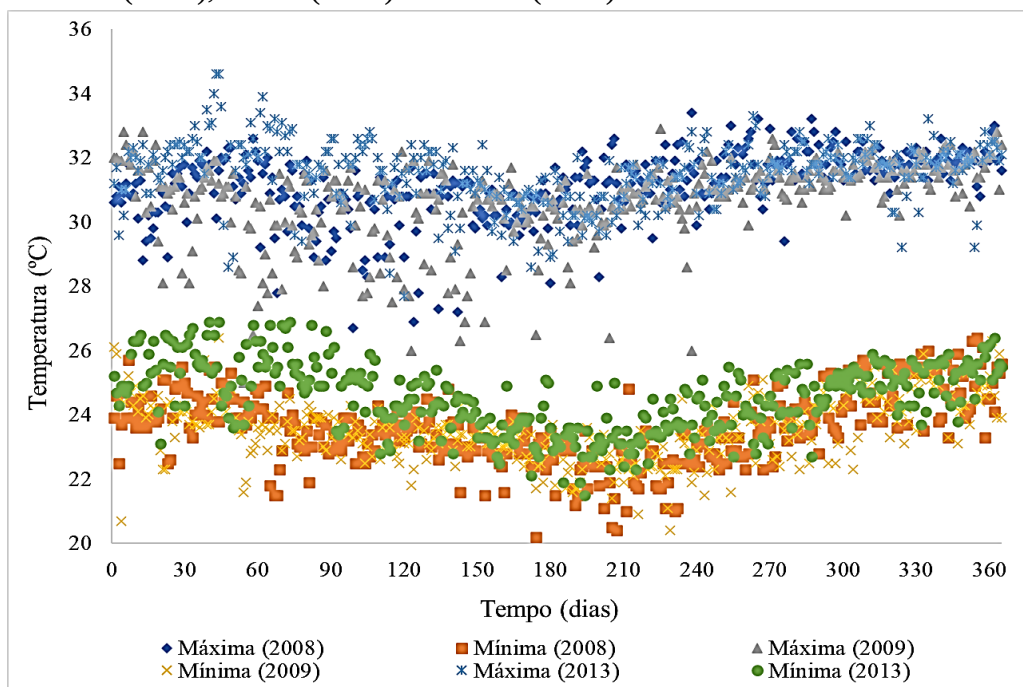
Para cada condição de precipitação (máxima, média e mínima), foram atribuídos os parâmetros diários de precipitação (Figura 16), de temperaturas máxima e mínima (Figura 17), de umidade relativa do ar (Figura 18) e de velocidade dos ventos (Figura 19), detalhados no Apêndice A (Quadros 2, 3 e 4).

Figura 16 – Precipitação diária para as condições máxima (2009), média (2008) e mínima (2013).



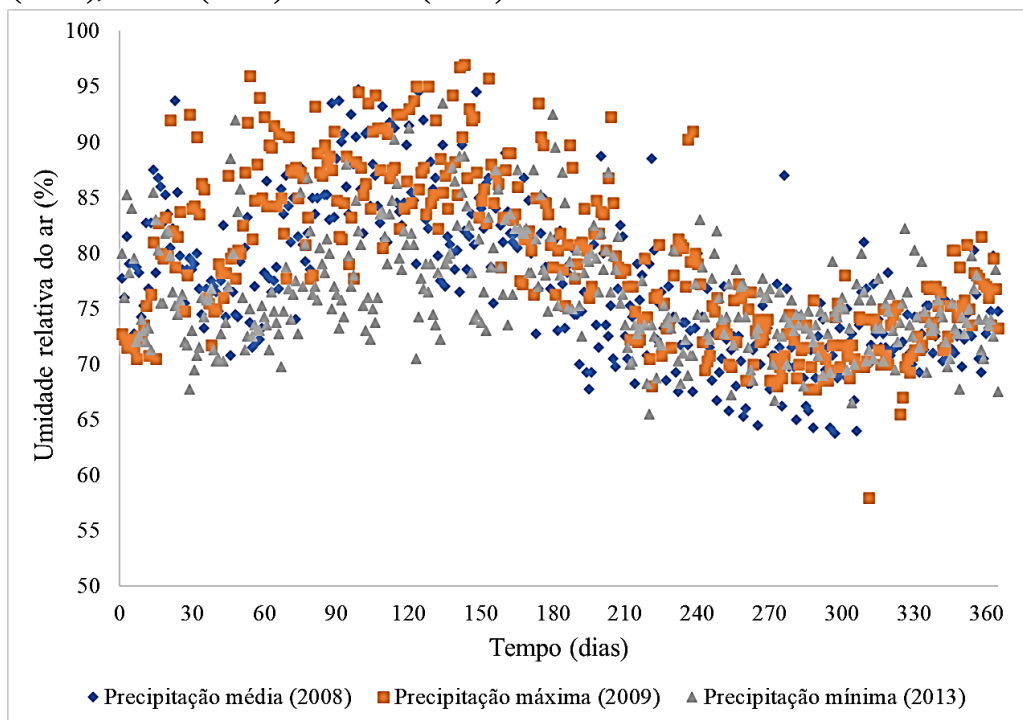
Fonte: FUNCEME (2020).

Figura 17 – Temperaturas máxima e mínima diária para as condições de precipitação máxima (2009), média (2008) e mínima (2013).



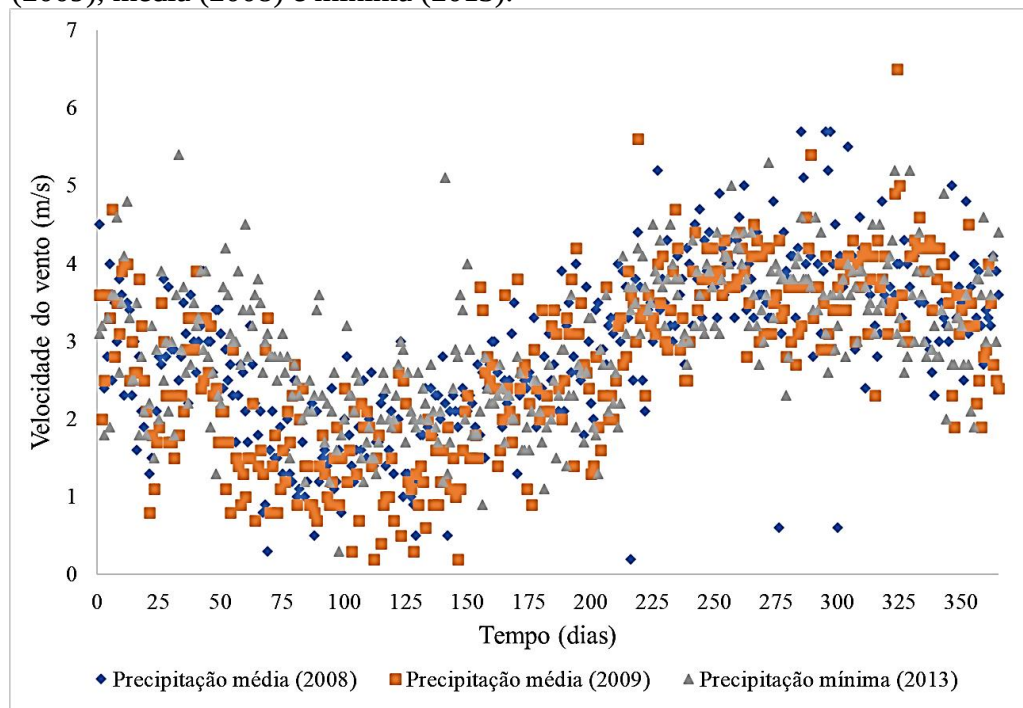
Fonte: FUNCEME (2020).

Figura 18 – Umidade relativa do ar diária para as condições de precipitação máxima (2009), média (2008) e mínima (2013).



Fonte: FUNCEME (2020).

Figura 19 – Velocidade dos ventos diária para as condições de precipitação máxima (2009), média (2008) e mínima (2013).

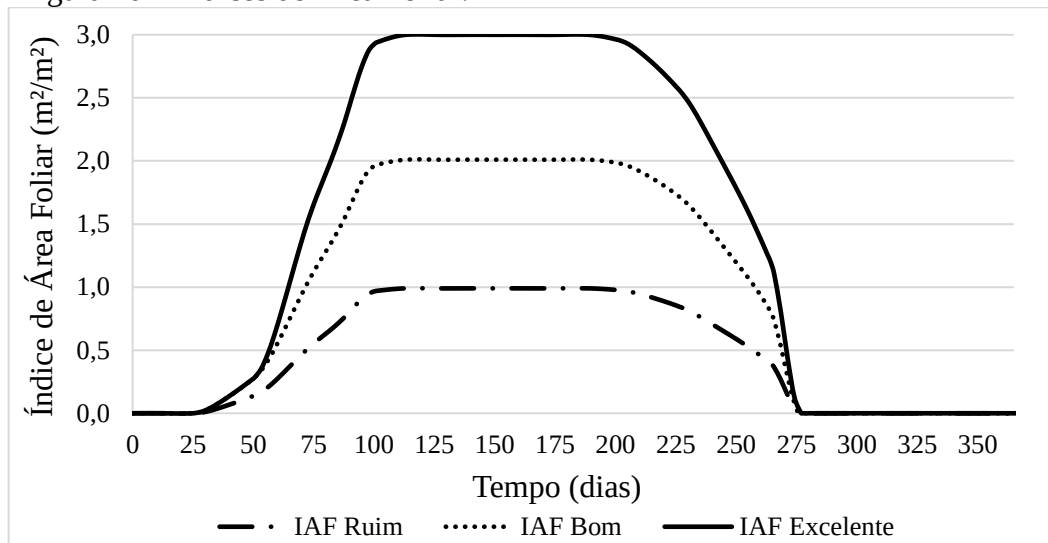


Fonte: FUNCEME (2020).

3.4 Condições de contorno de vegetação

Objetivou-se verificar a influência da vegetação no desempenho dos sistemas de coberturas secas propostos a partir da variação do Índice de Área Foliar. Nesse intuito, três condições de cobertura vegetal foram simuladas: ruim (IAF máximo de 1,0), boa (IAF máximo de 2,0) e excelente (IAF máximo de 3,0) (Figura 20). Ademais, considerou-se a condição sem vegetação.

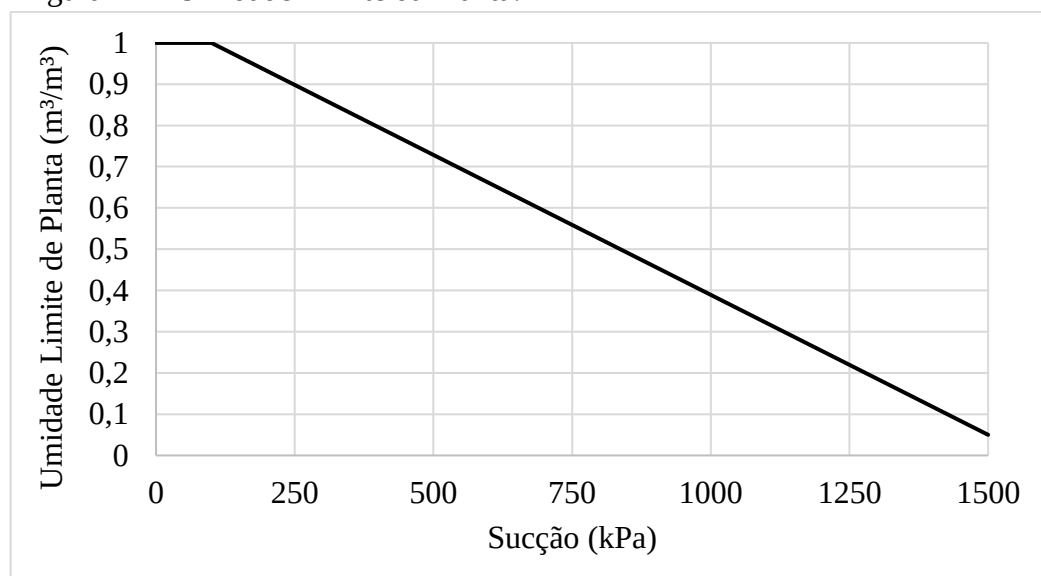
Figura 20 – Índices de Área Foliar.



Fonte: Autor (2021).

Atribuiu-se, então, as condições de Umidade Limite da Planta em função da sucção (Figura 21). Nesta função, a vegetação atinge um ponto de murcha referente à sucção de 100 kPa e é completamente incapaz de extrair água quando a sucção atinge 1500 kPa.

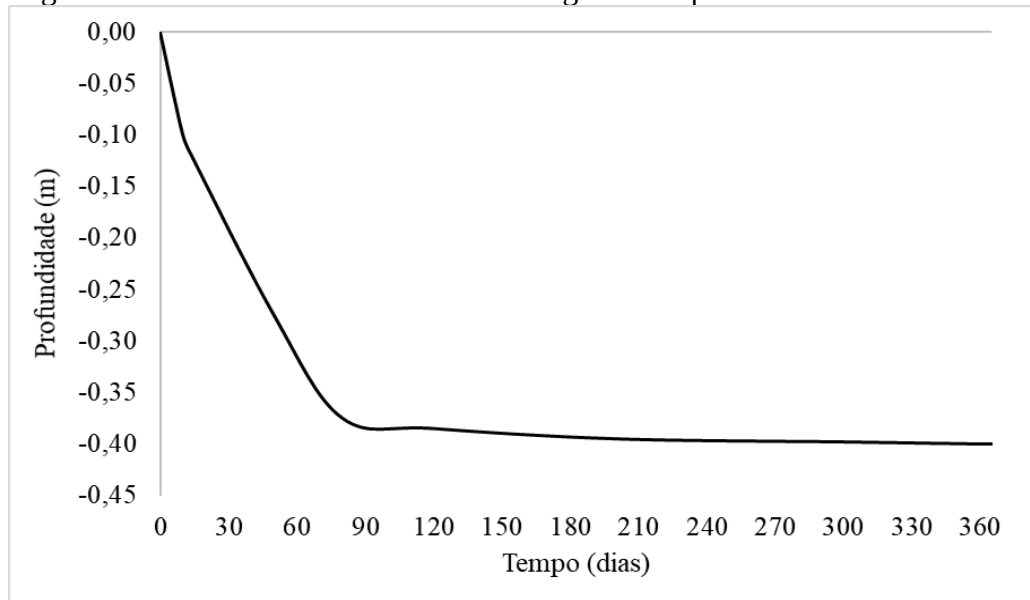
Figura 21 – Umidade Limite da Planta.



Fonte: Autor (2021).

O Perfil de Zona Radicular adotado constitui-se da distribuição radicular retangular e do crescimento das raízes conforme a curva da Figura 22. No período de um ano, as raízes atingem profundidade de 40 cm, valor se compatibiliza com estudos de Amorim (2008) e Ribeiro (2011).

Figura 22 – Profundidade das raízes ao longo do tempo.



Fonte: Autor (2021).

3.5 Modelos numéricos e aspectos complementares

Aplicou-se, ainda, na base da camada de resíduos, uma condição de contorno de gradiente hidráulico unitário.

O *software* calculou um parâmetro de erro acumulado, em volume de líquido (mm), para cada um dos 365 dias estabelecidos como *time step* – que são marcos temporais em que se deseja visualizar os resultados (nesta pesquisa, a cada período de um dia). Para isso, considera a diferença o fluxo de água e o armazenamento da camada. Este erro deve ser correlacionado às condições de cada simulação numérica, sendo considerada, neste trabalho, a relação percentual entre o erro acumulado e o volume total de precipitação. Portanto, quanto mais próximo de zero for essa porcentagem, mais representativa será a análise. Souza (2018), que utilizou o mesmo software para análise de coberturas secas com adição de resíduos, encontrou em suas análises erros da ordem de 1,0 a 1,3%.

As modelagens realizadas consideraram, para cada perfil de cobertura, as condições de precipitação máxima, média e mínima e as condições de cobertura sem vegetação e com

vegetação de IAF ruim (máximo IAF de 1), IAF bom (máximo IAF) e IAF excelente (máximo IAF), totalizando 36 modelagens numéricas (Quadro 1).

Quadro 1 – Modelagens numéricas realizadas.

Modelagem	Perfil da camada de cobertura			Condições climáticas			Condições de vegetação			
				Precipitação			Índice de Área Foliar			
	A	B	C	Máxima	Média	Mínima	Sem vegetação	Ruim	Bom	Ótimo
1	X			X			X			
2	X			X				X		
3	X			X					X	
4	X			X						X
5	X				X		X			
6	X				X			X		
7	X				X				X	
8	X				X					X
9	X					X	X			
10	X					X		X		
11	X					X			X	
12	X					X				X
13		X		X			X			
14		X		X				X		
15		X		X					X	
16		X		X						X
17		X			X		X			
18		X			X			X		
19		X			X				X	
20		X			X					X
21		X				X	X			
22		X				X		X		
23		X				X			X	
24		X				X				X
25			X	X			X			
26			X	X				X		
27			X	X					X	
28			X	X						X
29			X		X		X			
30			X		X			X		
31			X		X				X	
32			X		X					X
33			X			X	X			
34			X			X		X		
35			X			X			X	
36			X			X				X

Fonte: Autor (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se, a seguir, os resultados obtidos neste trabalho e as discussões pertinentes.

4.1 Saturação

Para análise dos perfis de saturação, considerou-se a condição de precipitação média e a camada de cobertura sem vegetação e com vegetação de IAF bom. Foram adotadas duas perspectivas de análise: período chuvoso e seco. O período chuvoso compreende o primeiro quadrimestre do ano, em que se verificou elevado volume de precipitação (67,8% do volume de precipitação anual). O período seco corresponde ao último quadrimestre, com baixo volume de precipitação (0,8% do volume de precipitação anual). Para análise da saturação em função do tempo, foram selecionadas medições com intervalos de 15 dias, considerando os pontos de base, horizonte intermediário e interface entre camadas de materiais distintos.

4.1.1 Perfil A

De maneira geral, observou-se que a saturação da camada de cobertura e da massa de resíduos diminui ao longo do tempo, tanto para a condição sem vegetação, como para a condição com cobertura vegetal de IAF bom (Figura 23). Verificou-se, ainda, que menores valores de saturação são encontrados nas camadas mais superficiais da cobertura – comportamento esperado, uma vez que há o aumento do contato com a atmosfera e, conseqüentemente, a submissão da camada à radiação solar, ação dos ventos e de intempéries diversas.

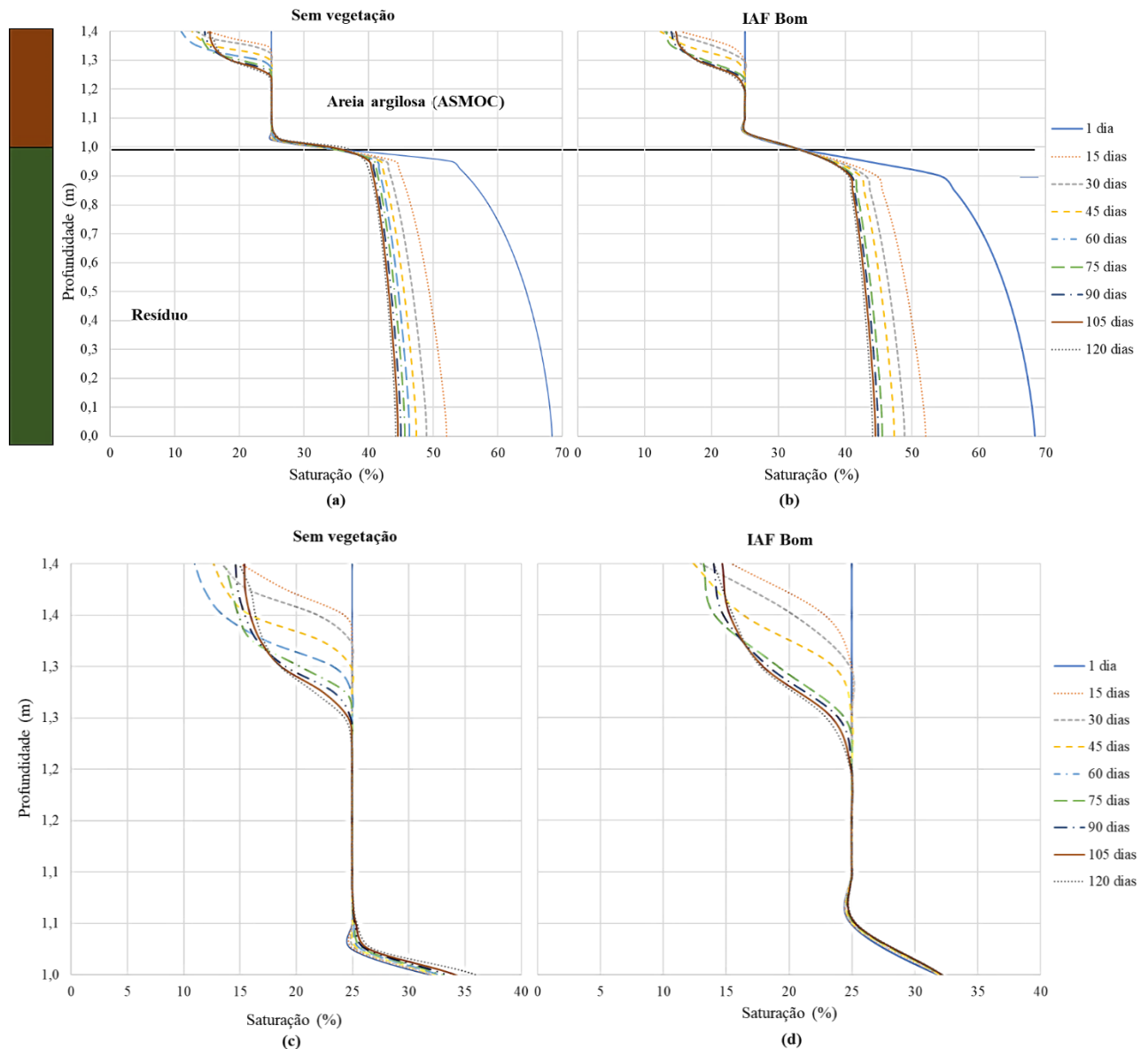
No período chuvoso, o horizonte intermediário da camada de resíduos (0,5 m) apresentou valores de saturação que variaram entre 64,5 e 42,7%. A presença da vegetação não interferiu de maneira considerável no comportamento da saturação e apresentou, assim como a camada sem vegetação, uma tendência de diminuição da saturação ao longo do tempo.

Na base da camada de cobertura composta pela areia argilosa, área de contato entre o solo e o resíduo (1 m), a saturação variou entre 31,8 e 35,9% na condição sem vegetação e entre 31,8 e 32,2% na condição com cobertura vegetal de IAF bom. Verificou-se, assim, que a vegetação implicou uma redução da saturação em relação à camada de cobertura sem vegetação. É possível atribuir tal comportamento ao crescimento das raízes ao longo do tempo, que extraem e utilizam a água disponível para realização de seus processos biológicos, como a fotossíntese (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

No horizonte intermediário da camada de cobertura (1,2 m), tanto para condição sem vegetação, quanto para a de cobertura vegetal com IAF bom, verificou-se tendência constante nos valores de saturação, em torno de 25%. A superfície da camada de cobertura (1,4 m), por sua vez, apresenta maior sensibilidade nos valores de saturação, variando entre 25,0 e 14,0%.

A camada de cobertura com vegetação apresentou valores de saturação até 6% inferiores aos observados na camada de cobertura sem vegetação (Tabela 8).

Figura 23 – Saturação ao longo do perfil A (a) sem vegetação e (b) com vegetação de IAF bom, considerando o período chuvoso do ano de precipitação média.



Fonte: Autor (2021).

Tabela 8 – Saturação ao longo do perfil A, em função da profundidade e das condições de vegetação, para o período chuvoso do ano.

Saturação (%) - Precipitação média - Sem vegetação									
Y (m)	Tempo (dias)								
	1	15	30	45	60	75	90	105	120
0,0	68,450	52,110	48,970	47,380	46,350	45,610	45,030	44,560	44,170
0,5	64,450	49,400	46,800	45,480	44,620	44,000	43,520	43,120	42,790
1,0	31,790	31,990	32,190	32,410	32,660	32,970	33,390	34,130	35,900
1,2	24,970	24,970	24,970	24,970	24,970	24,970	24,970	24,970	24,960
1,4	24,970	15,090	13,360	12,660	10,950	13,680	14,630	15,400	14,920
Saturação (%) - Precipitação média – IAF Bom									
0,0	68,373	52,034	48,905	47,315	46,291	45,549	44,974	44,509	44,121
0,5	64,119	49,214	46,654	45,350	44,508	43,897	43,423	43,039	42,719
1,0	31,779	31,833	31,883	31,933	31,981	32,027	32,073	32,118	32,162
1,2	24,967	24,967	24,967	24,967	24,966	24,963	24,951	24,925	24,880
1,4	24,967	15,366	12,967	12,381	10,604	13,202	13,985	14,693	14,022
Diferença percentual (%) IAF Bom/Sem vegetação									
0,0	-0,112	-0,146	-0,132	-0,137	-0,127	-0,135	-0,125	-0,115	-0,111
0,5	-0,513	-0,377	-0,312	-0,286	-0,251	-0,235	-0,223	-0,187	-0,166
1,0	-0,034	-0,490	-0,953	-1,473	-2,079	-2,859	-3,944	-5,897	-10,413
1,2	-0,014	-0,014	-0,013	-0,013	-0,015	-0,028	-0,076	-0,180	-0,321
1,4	-0,014	1,832	-2,938	-2,202	-3,162	-3,493	-4,406	-4,588	-6,021

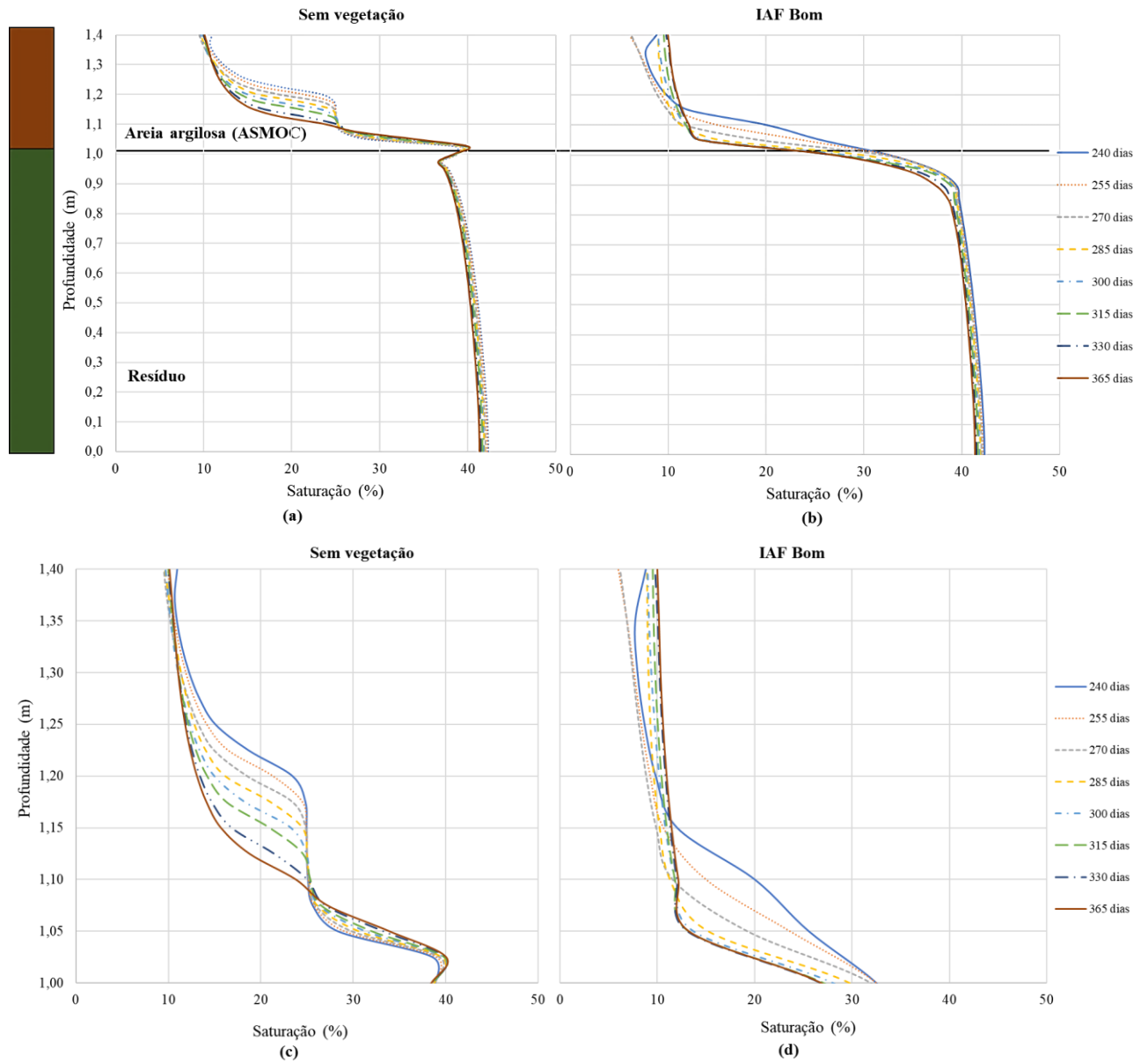
Fonte: Autor (2021).

No período seco, compreendido no último quadrimestre do ano, foram observados baixos valores de saturação da camada de cobertura, que variaram em torno de 9 a 11% da superfície ao horizonte intermediário da camada. Na base da camada, a cobertura sem vegetação apresentou tendência constante nos valores de saturação (em torno de 38,8%), enquanto a camada de cobertura com vegetal de IAF bom apresentou decréscimo de 32,5 para 26,8% (Tabela 9).

A adoção de cobertura vegetal de IAF bom implicou considerável redução na saturação da camada de cobertura. No horizonte intermediário, a cobertura vegetal implicou redução de até 58% em relação à camada sem vegetação. Menores reduções foram observadas, ainda, na superfície da camada (até 19,8%) e na base da camada (até 30,4%).

A camada de resíduos apresentou saturação com tendência constante ao longo do período seco, tanto na condição sem vegetação, quanto na condição de IAF bom. A cobertura vegetal, diferentemente da camada de solo, não influenciou de forma considerável a condição de saturação da massa de resíduos (Figura 24).

Figura 24 – Saturação ao longo do perfil A (a) sem vegetação e (b) com vegetação de IAF bom, considerando o período seco do ano de precipitação média.



Fonte: Autor (2021).

Tabela 9 – Saturação ao longo do perfil A, em função da profundidade e das condições de vegetação, para o período seco do ano.

Precipitação média - Sem vegetação								
Y (m)	Tempo (dias)							
	240	255	270	285	300	315	330	365
0,0	42,323	42,172	42,031	41,899	41,775	41,658	41,444	41,314
0,5	41,137	41,001	40,875	40,757	40,648	40,546	40,359	40,247
1,0	38,867	38,853	38,824	38,779	38,723	38,658	38,523	38,44
1,2	23,453	21,357	18,551	16,17	14,985	14,185	13,431	13,096
1,4	10,979	9,949	9,511	9,631	9,691	9,979	9,943	10,12
Precipitação média - IAF Bom								
0,0	42,314	42,173	42,041	41,917	41,8	41,692	41,493	41,372
0,5	41,221	41,103	40,993	40,89	40,792	40,701	40,532	40,427
1,0	32,514	32,511	31,923	29,728	28,017	27,075	26,785	26,824
1,2	9,834	9,292	8,873	9,643	10,172	10,449	10,856	10,942
1,4	8,809	6,015	6,188	8,95	8,98	9,56	9,797	9,989
Diferença percentual - IAF Bom/Sem vegetação								
0,0	-0,021	0,002	0,024	0,043	0,060	0,082	0,118	0,140
0,5	0,204	0,249	0,289	0,326	0,354	0,382	0,429	0,447
1,0	-16,345	-16,323	-17,775	-23,340	-27,648	-29,963	-30,470	-30,219
1,2	-58,069	-56,492	-52,170	-40,365	-32,119	-26,338	-19,172	-16,448
1,4	-19,765	-39,542	-34,938	-7,071	-7,337	-4,199	-1,468	-1,294

Fonte: Autor (2021).

4.1.2 Perfil B

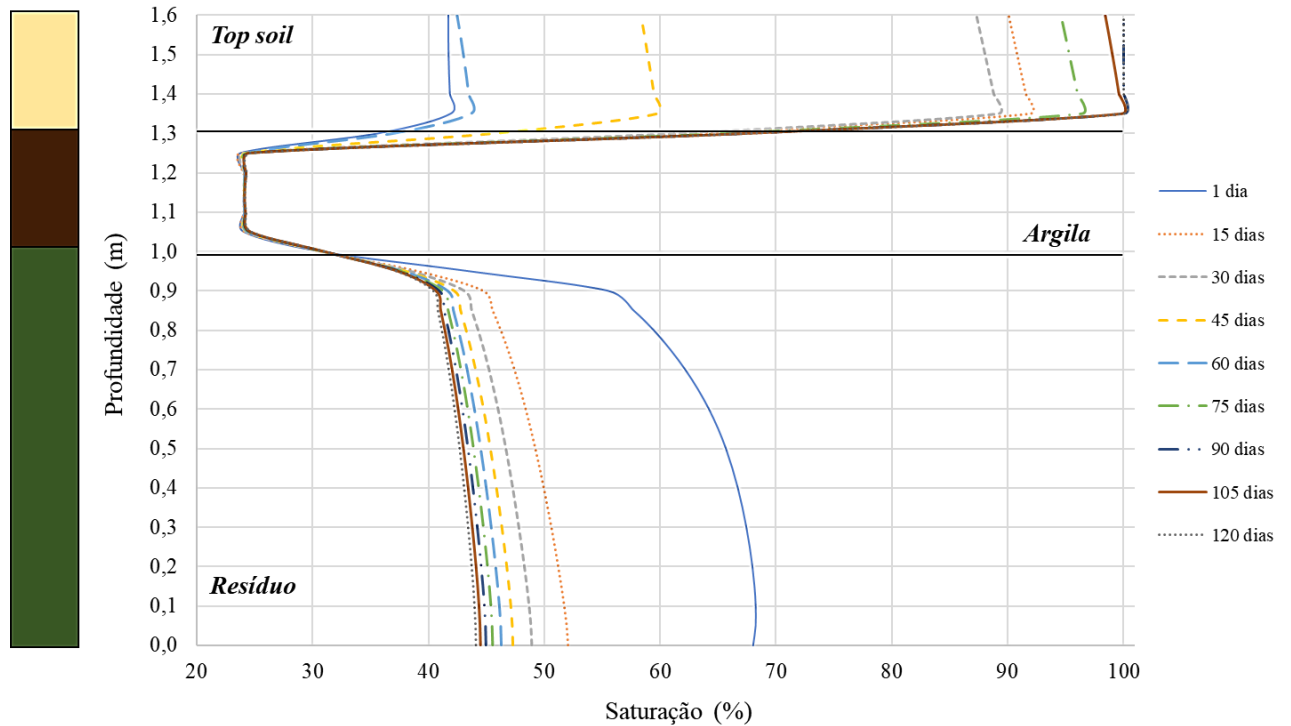
Considerando o período chuvoso, observou-se que a saturação diminuiu ao longo do tempo na camada de resíduos, variando entre 68,0 e 44,1% na base da camada (0 m) e entre 65,7 e 42,7% no horizonte intermediário (0,5 m).

Na interface entre a camada de resíduos e a de argila (1 m), bem como em maior parte da camada de argila (1,0 a 1,25 m), verificou-se que a saturação apresentou tendência constante. Na parte superior da camada de argila (1,25 a 1,3 m), observou-se um aumento dos valores de saturação, alcançando até 67,6%.

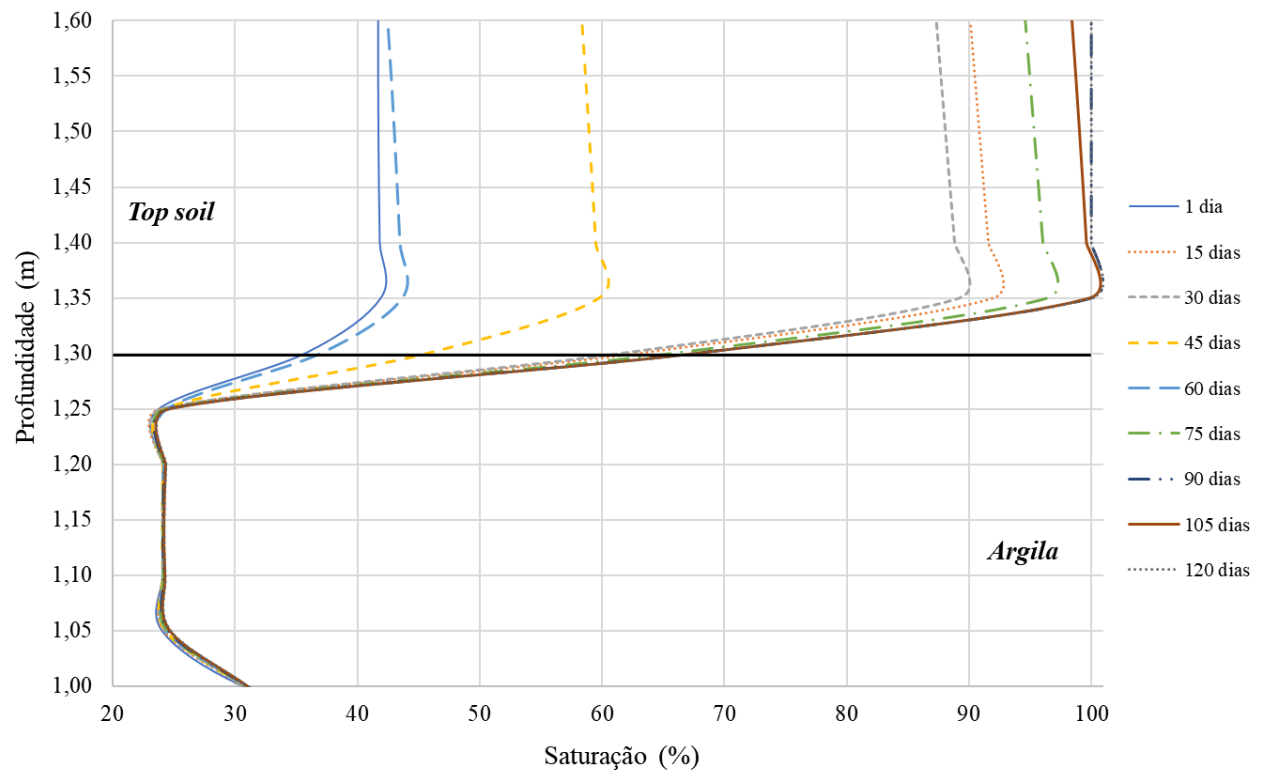
A camada *Top soil* apresentou maior sensibilidade nos valores de saturação ao longo do tempo, variando entre 41,7 e 100% (condição de total saturação da camada superficial) (Figura 25).

De forma geral, a adoção da cobertura vegetal com IAF bom não implicou diferenças significativas no perfil de saturação das camadas em relação à cobertura sem vegetação, não atingindo 1% (Tabela 10).

Figura 25 – Saturação ao longo do perfil B nas condições sem vegetação e com vegetação de IAF bom, considerando o período chuvoso do ano de precipitação média.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2021).

Tabela 10 – Saturação ao longo do perfil B, em função da profundidade e das condições de vegetação, para o período chuvoso do ano.

Precipitação média - Sem vegetação									
Y (m)	Tempo (dias)								
	1	15	30	45	60	75	90	105	120
0,00	68,056	52,056	48,901	47,295	46,285	45,542	44,968	44,506	44,114
0,50	65,703	49,235	46,660	45,349	44,501	43,888	43,413	43,032	42,708
1,00	30,636	30,699	30,759	30,815	30,868	30,916	30,959	30,999	31,038
1,15	24,076	24,077	24,080	24,088	24,101	24,116	24,135	24,156	24,181
1,30	35,763	62,823	61,460	45,678	36,965	65,572	67,470	67,507	67,609
1,45	41,781	91,199	88,437	59,226	43,253	95,661	100,000	99,302	100,000
1,60	41,720	90,096	87,314	58,365	42,468	94,582	100,000	98,393	100,000
Precipitação média - IAF Bom									
0,00	68,056	52,056	48,900	47,295	46,286	45,540	44,968	44,506	44,114
0,50	65,703	49,235	46,659	45,349	44,502	43,888	43,413	43,032	42,708
1,00	30,636	30,699	30,759	30,815	30,868	30,916	30,959	30,999	31,038
1,15	24,076	24,077	24,080	24,088	24,101	24,116	24,135	24,156	24,181
1,30	35,763	62,824	61,459	45,698	37,112	65,851	67,470	67,507	67,610
1,45	41,781	91,199	88,436	59,263	43,521	96,195	100,000	99,302	100,000
1,60	41,720	90,096	87,314	58,401	42,741	95,126	100,000	98,392	100,000
Diferença percentual - IAF Bom/Sem vegetação									
0,00	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,002	-0,006	0,000	0,000	0,000
0,50	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
1,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,15	0,000	0,000	-0,001	0,061	0,620	0,558	0,000	-0,001	0,000
1,30	0,000	0,000	-0,001	0,062	0,642	0,576	0,000	-0,001	0,000
1,45	0,000	0,000	-0,001	0,061	0,620	0,558	0,000	-0,001	0,000
1,60	0,000	0,000	-0,001	0,062	0,642	0,576	0,000	-0,001	0,000

Fonte: Autor (2021).

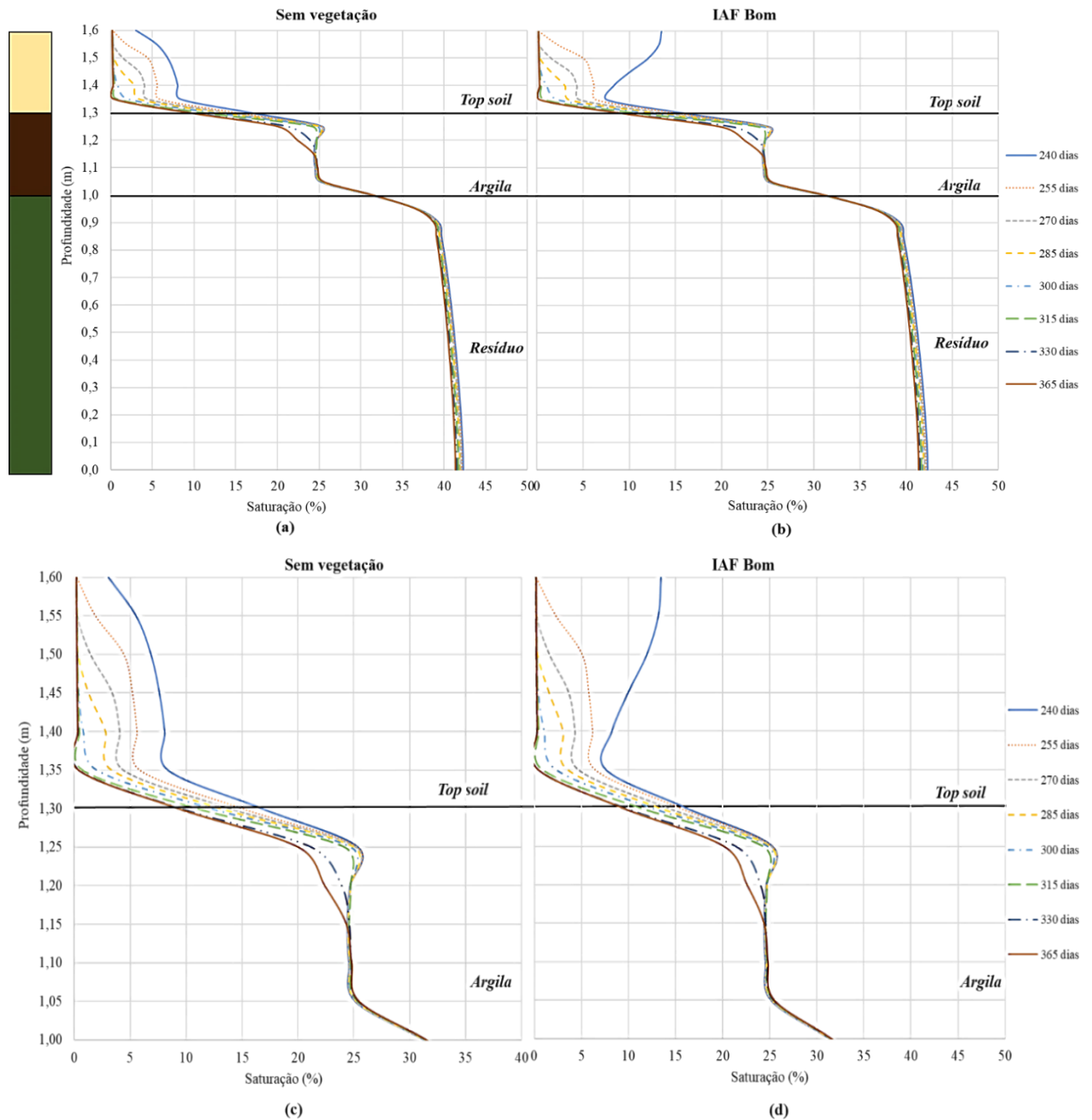
No período seco, a camada de resíduos (0,00 a 1,00 m) apresentou saturação que variou entre 42,3 e 31,3%, com tendência de diminuição da saturação ao longo do tempo. A adoção de cobertura vegetal de IAF bom não implicou alterações nas condições de saturação (Figura 26)

A camada de argila apresentou saturação média de 24,4% em seu horizonte intermediário (1,15 m). Na parte superior da camada (1,30 m), interface argila-*Top soil*, a saturação encontrou-se na faixa de 16,7 e 9,3%. Essa camada mostrou-se discretamente sensível à presença da cobertura vegetal na parte superior (1,30 m), com variações de até 3%, com tendência de diminuição da influência da vegetação ao longo do período seco (Tabela 11).

A camada *Top soil* apresentou valores baixos de saturação, que diminuíram com o decorrer dos dias, alcançando proximidade com a condição totalmente seca no fim do período analisado. Entre as verificações dos dias 240 a 285, foi possível perceber influência da

vegetação na saturação dessa camada. No dia 240, houve uma importante discrepância entre os valores de saturação para a camada de cobertura sem vegetação (3,02%) e com vegetação com IAF bom (13,47%).

Figura 26 – Saturação ao longo do perfil B (a); (c) sem vegetação e (b); (d) com vegetação de IAF bom, considerando o período seco do ano de precipitação média.



Fonte: Autor (2021).

Tabela 11 – Saturação ao longo do perfil B, em função da profundidade e das condições de vegetação, para o período seco do ano.

Precipitação média - Sem vegetação								
Y (m)	Tempo (dias)							
	240	255	270	285	300	315	330	365
0,00	42,306	42,164	42,031	41,907	41,791	41,683	41,484	41,363
0,50	41,207	41,088	40,977	40,873	40,777	40,686	40,519	40,417
1,00	31,291	31,318	31,346	31,373	31,400	31,427	31,479	31,513
1,15	24,423	24,455	24,487	24,519	24,549	24,576	24,593	24,350
1,30	16,772	15,010	13,910	13,091	12,250	10,946	9,500	9,315
1,45	7,584	5,178	3,364	1,256	0,390	0,325	0,264	0,265
1,60	3,020	0,183	0,169	0,154	0,162	0,183	0,166	0,183
Precipitação média - IAF Bom								
0,00	42,307	42,164	42,031	41,907	41,791	41,683	41,484	41,363
0,50	41,207	41,088	40,977	40,873	40,777	40,686	40,519	40,417
1,00	31,291	31,318	31,346	31,373	31,400	31,427	31,479	31,513
1,15	24,422	24,454	24,486	24,517	24,546	24,574	24,598	24,403
1,30	16,104	15,432	14,137	13,230	12,396	11,202	9,532	9,333
1,45	9,984	5,775	3,649	1,553	0,407	0,338	0,266	0,266
1,60	13,468	0,160	0,162	0,155	0,162	0,184	0,167	0,183
Diferença percentual - IAF Bom/Sem vegetação								
0,00	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,50	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,15	-0,002	-0,003	-0,006	-0,008	-0,010	-0,012	0,020	0,219
1,30	-3,987	2,810	1,630	1,059	1,194	2,340	0,341	0,198
1,45	31,644	11,536	8,472	23,654	4,382	3,865	0,866	0,558
1,60	345,912	-12,812	-4,342	0,404	0,245	0,404	0,099	0,070

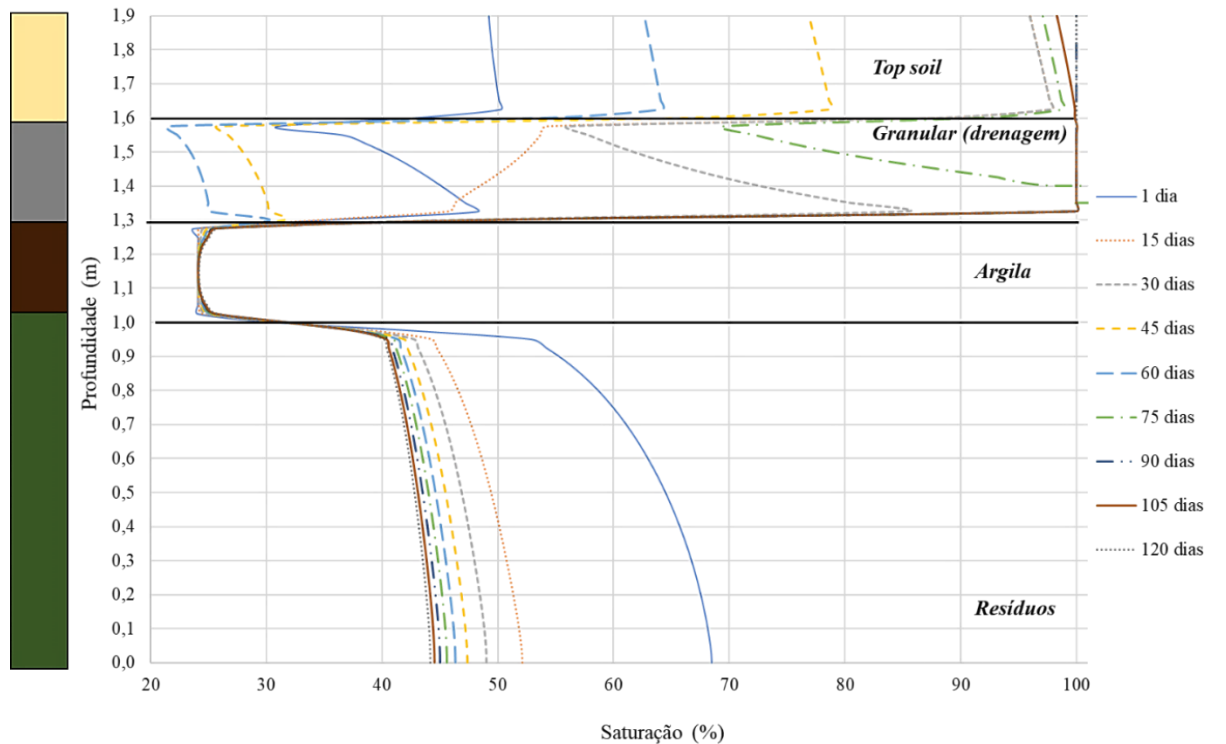
Fonte: Autor (2021).

4.1.3 Perfil C

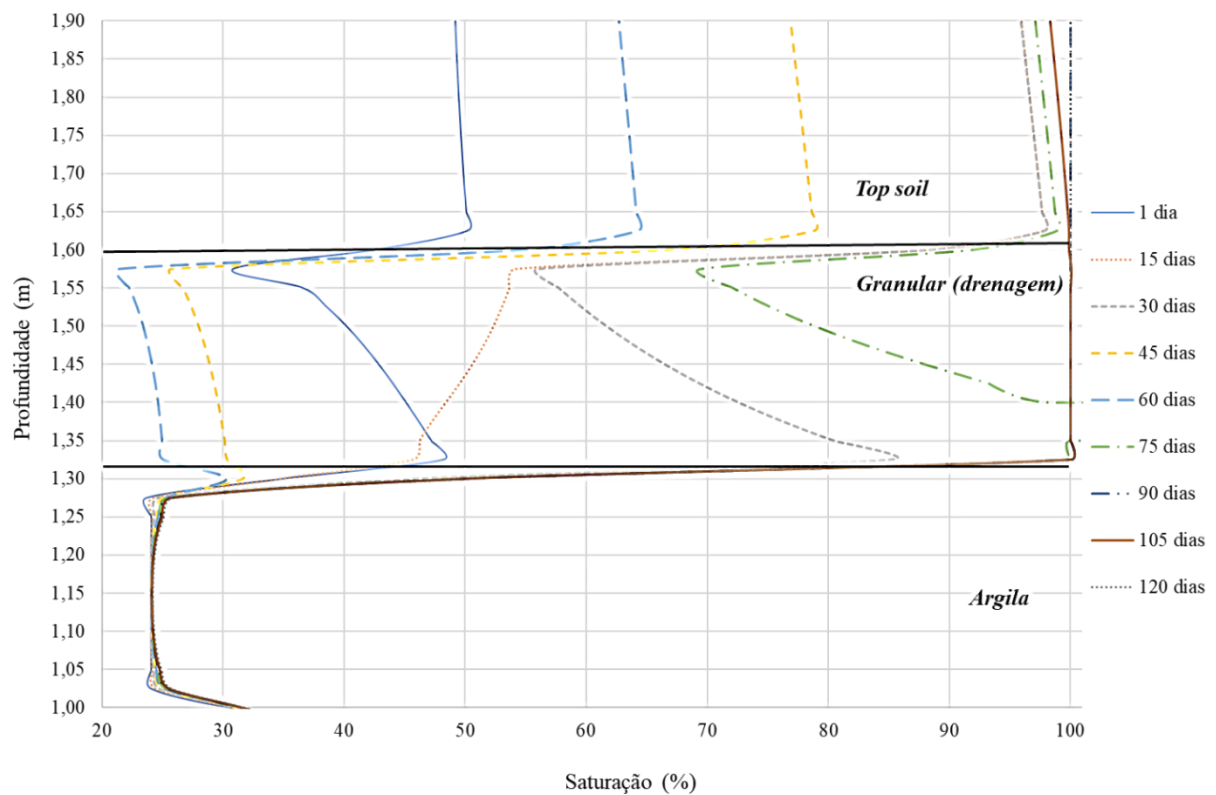
Observou-se, no período chuvoso, uma tendência de diminuição da saturação na camada de resíduo, compreendida entre 68,5 e 44,2% na base da camada de resíduos e entre 64,48 e 42,8% em seu horizonte intermediário.

Na interface entre a camada de resíduos e a de argila (1 m), bem como em maior parte da camada de argila (1,00 a 1,25 m), verificou-se que a saturação apresentou tendência constante – comportamento similar ao observado no perfil B. Na parte superior da camada de argila (1,25 a 1,30 m), houve aumento dos valores de saturação, variando de 35,0 a 50,2% ao longo do período (Figura 27).

Figura 27 – Saturação ao longo do perfil C nas condições sem vegetação e com vegetação de IAF bom, considerando o período chuvoso do ano de precipitação média.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2021).

As camadas de solo granular e de *Top soil*, entretanto, apresentaram tendência de aumento da saturação ao longo do período chuvoso. A camada de solo granular apresentou, em

sua base (interface solo granular-argila, 1,3m), saturação que variou entre 35 e 50,2%. No horizonte intermediário e no topo da camada de solo granular, as saturações variaram entre 42,6% e 100% – condição de total saturação do solo. Comportamento similar foi observado na camada de *Top soil* (Tabela 12).

A cobertura vegetal de IAF bom não influenciou o comportamento da saturação nas camadas de cobertura, apresentando diferença percentual entre a camada com e sem vegetação inferiores a 1%.

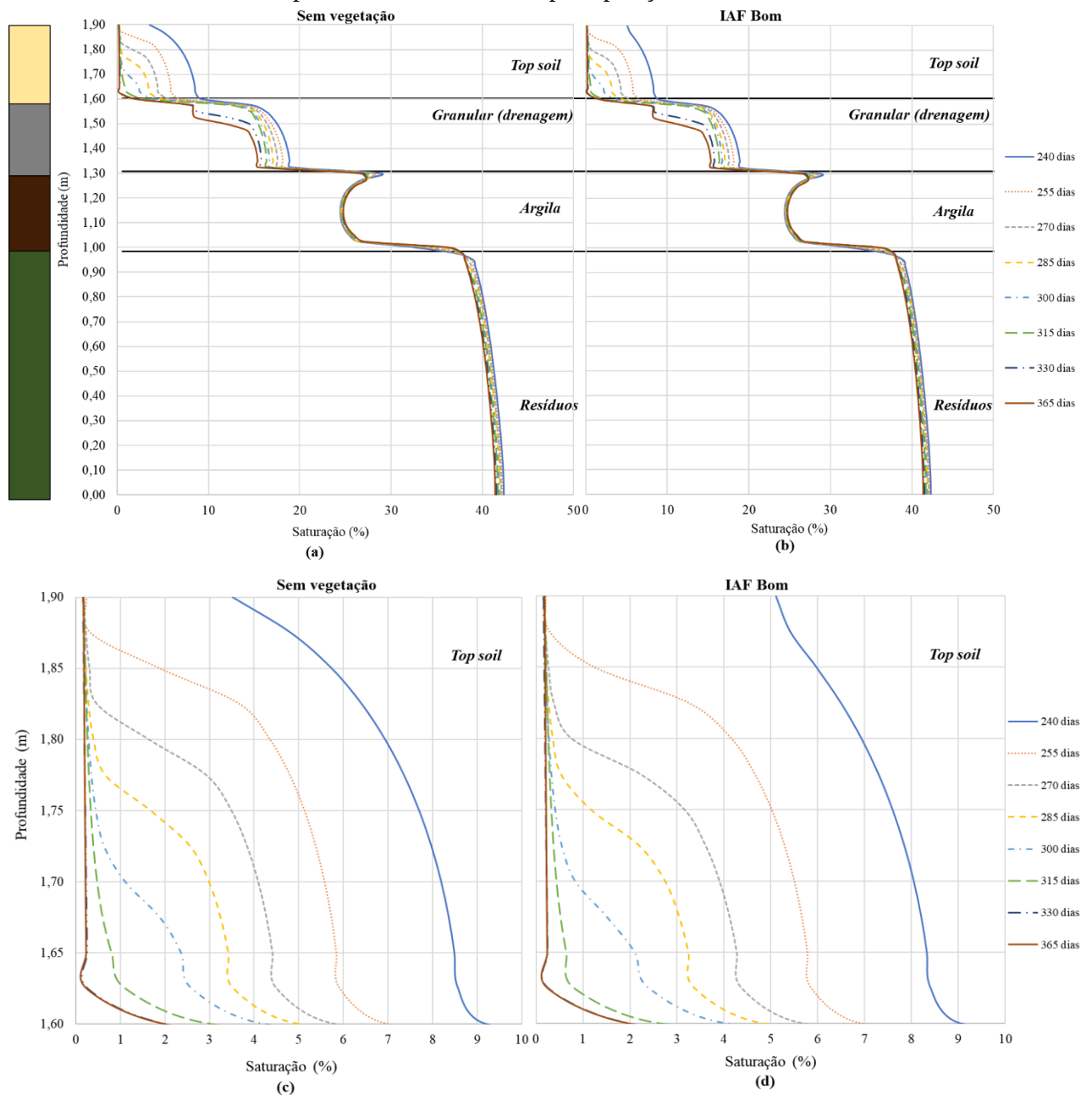
Tabela 12 – Saturação ao longo do perfil C, em função da profundidade e das condições de vegetação, para o período chuvoso do ano.

Precipitação média - Sem vegetação									
Y (m)	Tempo (dias)								
	1	15	30	45	60	75	90	105	120
0,00	68,480	52,099	48,988	47,371	46,347	45,598	45,023	44,556	44,164
0,50	64,480	49,394	46,851	45,472	44,622	43,997	43,511	43,122	42,794
1,00	30,649	30,865	31,033	31,182	31,304	31,409	31,507	31,597	31,685
1,15	24,076	24,076	24,077	24,080	24,086	24,097	24,113	24,133	24,157
1,30	34,948	34,797	46,145	31,595	30,285	49,443	49,840	49,916	50,222
1,45	42,869	50,622	66,494	28,869	24,149	87,962	100,000	100,000	100,000
1,60	42,640	88,182	88,127	66,657	54,371	91,817	100,000	99,872	100,000
1,75	49,669	97,014	96,977	77,954	63,548	98,081	100,000	99,227	100,000
1,90	49,206	95,977	95,919	76,905	62,687	97,083	100,000	98,310	100,000
Precipitação média - IAF Bom									
0,00	68,480	52,099	48,988	47,371	46,347	45,600	45,023	44,555	44,165
0,50	64,481	49,394	46,851	45,472	44,621	43,998	43,511	43,121	42,794
1,00	30,649	30,865	31,033	31,182	31,304	31,409	31,507	31,597	31,685
1,15	24,076	24,076	24,077	24,080	24,086	24,097	24,113	24,133	24,157
1,30	34,948	34,797	46,143	31,597	30,294	49,447	49,840	49,917	50,222
1,45	42,869	50,622	66,490	28,876	24,177	90,693	100,000	100,000	100,000
1,60	42,640	88,182	88,126	66,696	54,584	92,151	100,000	99,929	100,000
1,75	49,669	97,014	96,977	77,998	63,803	98,152	100,000	99,238	100,000
1,90	49,206	95,977	95,919	76,949	62,939	97,159	100,000	98,322	100,000
Diferença percentual - IAF Bom/Sem vegetação									
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	-0,001	0,000
0,50	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	-0,001	0,000
1,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,30	0,000	0,000	-0,004	0,005	0,027	0,007	0,000	0,002	0,000
1,45	0,000	0,000	-0,005	0,023	0,115	3,104	0,000	0,000	0,000
1,60	0,000	0,000	-0,001	0,058	0,392	0,363	0,000	0,057	0,000
1,75	0,000	0,000	0,000	0,057	0,401	0,073	0,000	0,011	0,000
1,90	0,000	0,000	0,000	0,057	0,402	0,078	0,000	0,012	0,000

Fonte: Autor (2021).

No período seco, por fim, verificou-se que o comportamento da saturação foi similar nas condições de cobertura sem vegetação e com vegetação de IAF bom para as camadas de resíduos, de argila e de solo granular. A camada de *Top soil*, por sua vez, apresentou maior sensibilidade à presença da vegetação, que promoveu redução de saturação em até 45,2% (dia 240). De maneira geral, a saturação diminuiu ao longo do período seco do ano, atingindo situação próxima da totalmente seca (a partir do dia 300), conforme Figura 28 e Tabela 13.

Figura 28 – Saturação ao longo do perfil C (a); (c) sem vegetação e (b); (d) com vegetação de IAF bom, considerando o período seco do ano de precipitação média.



Fonte: Autor (2021).

Tabela 13 – Saturação ao longo do perfil C, em função da profundidade e das condições de vegetação, para o período seco do ano.

Precipitação média - Sem vegetação								
Y (m)	Tempo (dias)							
	240	255	270	285	300	315	330	365
0,00	42,345	42,201	42,068	41,943	41,826	41,716	41,515	41,392
0,50	41,265	41,143	41,029	40,922	40,821	40,725	40,543	40,430
1,00	32,774	33,273	34,373	35,495	35,982	36,189	36,392	36,471
1,15	24,421	24,459	24,498	24,538	24,578	24,619	24,701	24,755
1,30	28,849	28,450	28,113	27,819	27,556	27,316	26,883	26,589
1,45	18,199	17,525	17,003	16,580	16,224	15,919	15,243	14,628
1,60	9,206	7,012	5,826	5,020	4,248	3,050	2,029	2,001
1,75	7,698	5,128	3,486	1,680	0,446	0,341	0,210	0,210
1,90	3,517	0,233	0,174	0,157	0,163	0,184	0,162	0,177
Precipitação média - IAF Bom								
0,00	42,346	42,201	42,068	41,943	41,826	41,716	41,515	41,392
0,50	41,266	41,143	41,029	40,922	40,821	40,725	40,543	40,430
1,00	32,772	33,271	34,365	35,491	35,980	36,189	36,392	36,471
1,15	24,420	24,459	24,498	24,538	24,578	24,619	24,701	24,755
1,30	28,875	28,473	28,134	27,838	27,575	27,334	26,898	26,595
1,45	18,248	17,562	17,034	16,609	16,252	15,947	15,233	14,594
1,60	9,068	6,967	5,729	4,888	4,095	2,680	2,021	1,996
1,75	7,596	5,026	3,169	1,180	0,407	0,321	0,208	0,208
1,90	5,108	0,205	0,162	0,156	0,162	0,183	0,161	0,177
Diferença percentual - IAF Bom/Sem vegetação								
0,00	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,50	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,00	-0,005	-0,006	-0,023	-0,010	-0,003	-0,002	-0,001	-0,001
1,15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,30	0,090	0,080	0,073	0,069	0,067	0,068	0,054	0,024
1,45	0,269	0,208	0,181	0,171	0,172	0,179	-0,065	-0,234
1,60	-1,506	-0,637	-1,677	-2,639	-3,599	-12,118	-0,394	-0,224
1,75	-1,317	-1,981	-9,092	-29,753	-8,644	-5,939	-1,161	-0,677
1,90	45,240	-12,020	-7,074	-0,436	-0,701	-0,757	-0,645	0,358

Fonte: Autor (2021).

4.1.4 Considerações gerais sobre a saturação dos sistemas de coberturas secas

A saturação influencia a permeabilidade ao ar do solo e o fluxo de gás das camadas de cobertura, constituindo-se um fator de alto impacto na inibição da geração de gases (EL-FADEL; FINDIKAKIS; LECKIE, 1997). A manutenção de um grau de saturação elevado sob diferentes condições climáticas é determinante para que o controle do fluxo de oxigênio pela

camada de cobertura, uma vez que o oxigênio tem sua difusão dificultada pela presença de água, que ocupa os vazios dos solos (SOUZA; BORMA; MENDONÇA, 2003).

O coeficiente de difusão de oxigênio em uma camada de solo argiloso é inversamente proporcional ao grau de saturação dessa camada. Entende-se, assim, que para garantir uma barreira efetiva contra a difusão do oxigênio, é necessário que o grau de saturação seja superior a 85%, mesmo em períodos secos (YANFUL, 1993).

Observa-se, ainda, que a saturação tem relação inversamente proporcional ao aumento da presença de bactérias metanotróficas. Baixos valores de saturação favorecem a entrada de oxigênio nos vazios do solo e o consequente desenvolvimento de bactérias metanotróficas (TEXEIRA *et al.*, 2009). Com isso, o processo de digestão aeróbia pode perdurar por um período maior que o devido e grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio (H₂) podem ser produzidas, principalmente se o aterro estiver seco (PACHECO, 2004).

Considerando o estudo da saturação realizado com o auxílio das modelagens numéricas, percebeu-se que o perfil A, composto por uma camada de areia argilosa de espessura de 0,4 m, não se mostrou apto a limitar o fluxo de oxigênio para o interior das massas de resíduo, uma vez que sua saturação situou-se entre 11,0 e 36% no período chuvoso e entre 9,5 e 38,9% no período seco, índices bastante inferiores aos 85% desejados, representando condição favorável à entrada de oxigênio e oxidação do metano derivado da biodegradação dos resíduos.

Verificou-se, no perfil B, em sua camada de *Top soil* com 0,3 m de espessura, perfil de saturação crescente ao decorrer do tempo, alcançando a saturação acima de 85% para os 25 cm mais superficiais de solo a partir do dia 72 e 100% de saturação a partir do dia 79. Os níveis de saturação permaneceram acima dos 85% até o dia 168, representando uma condição ideal de limitação de entrada de oxigênio durante 26% do ano.

A camada de argila apresentou condições de saturação entre 9,3 e 67,8% ao longo do ano, o que suscitou a observação da variação da umidade dessa camada. Identificou-se que, durante o período de 365 dias analisados, a umidade variou em torno de 4 a 30%. A exposição do sistema de cobertura a condições climáticas com taxas de precipitação discrepantes como as deste estudo fomentam a alteração da umidade ao longo do tempo, podendo implicar alterações volumétricas da camada de argila. Assim, entende-se que o decréscimo da umidade no período seco pode contribuir para o surgimento de trincas.

Identificou-se no perfil C, por fim, uma condição ideal de limitação da entrada de oxigênio nos 30 cm superficiais da camada de *Top soil* entre os dias 69 e 170, o que representa 27,7% do ano analisado.

A adoção de uma cobertura vegetal de IAF bom implicou, de maneira geral, a redução da saturação nos sistemas de coberturas, sendo sua influência mais pertinente no perfil A e no período seco do ano. O perfil A com vegetação apresentou até 10,5% de redução em relação à cobertura sem vegetação no período chuvoso, alcançando até 58% de redução no início do período seco.

Segundo Cao e Staszewska (2013), a oxidação de metano pode ser favorecida com a adição de vegetação na superfície da camada de cobertura, pois a vegetação promove a formação da rizosfera, o que favorece o desenvolvimento das bactérias metanotróficas. Além disso, as raízes promovem a formação de macroporos que auxiliam na difusão dos gases, principalmente do oxigênio atmosférico.

Dessa forma, considerando isoladamente a variação de saturação entre os perfis com e sem cobertura vegetal, a adoção de vegetação de IAF bom representa aspecto positivo para sistemas de coberturas em que não haja mecanismos de exploração energética e aproveitamento do biogás, uma vez que nesses casos, segundo Santos (2016), a predominância da fase aeróbia é desejada para estimular as reações bioquímicas que convertem CH_4 em CO_2 – gás que possui uma ação poluidora 25 vezes menor do que o CH_4 (IPCC, 2007). Já em situações em que haja a possibilidade de aproveitamento biogás, a redução da saturação pode representar diminuição da qualidade e do potencial energético do gás.

4.2 Balanço hídrico

O balanço hídrico dos sistemas de coberturas secas propostos foi analisado sob as seguintes perspectivas: (a) influência da presença de cobertura vegetal nas situações sem vegetação e com vegetação de IAF ruim, bom e excelente para as condições de precipitação máxima, média e mínima e (b) a influência do volume de precipitação anual acumulado.

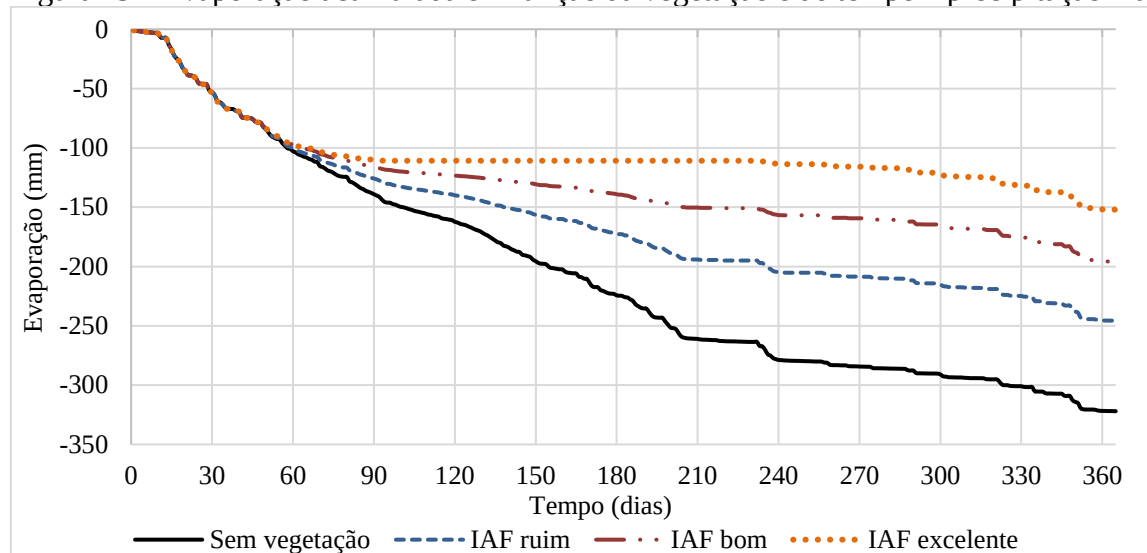
4.2.1 Perfil A

Observou-se que à medida que se aumentou o IAF, diminuiu-se o volume de evaporação do solo em todas as condições de precipitação. A influência da vegetação na redução da evaporação foi maior na condição de precipitação mínima, em que a adoção de um IAF

excelente possibilitou a redução do volume de evaporação em 63,7% em relação à camada de cobertura sem vegetação (Figuras 29, 30 e 31).

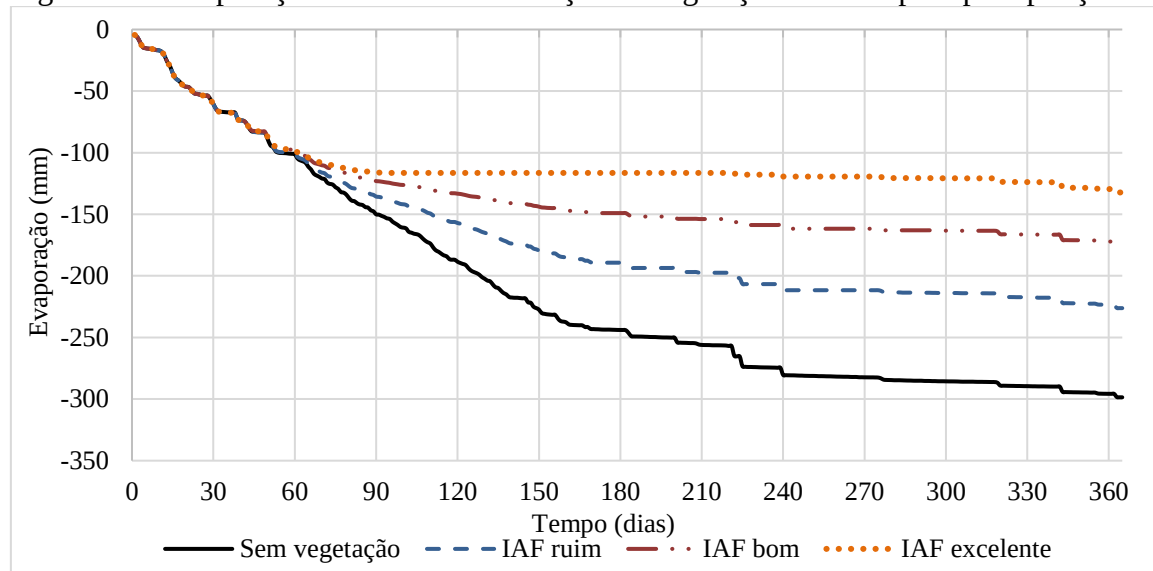
Observou-se, ademais, que para maiores volumes de precipitação anual, maior é o volume de evaporação da camada de cobertura. Entretanto, quando se considera a relação volume de evaporação/volume de precipitação anual acumulado, os maiores percentuais são encontrados na condição de precipitação mínima. A relação evaporação/precipitação para a camada sem vegetação nas condições de precipitação mínima, por exemplo, foi de 32,8%, enquanto para a condição de precipitação máxima foi de 13,7% (Tabela 14).

Figura 29 – Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação máxima.



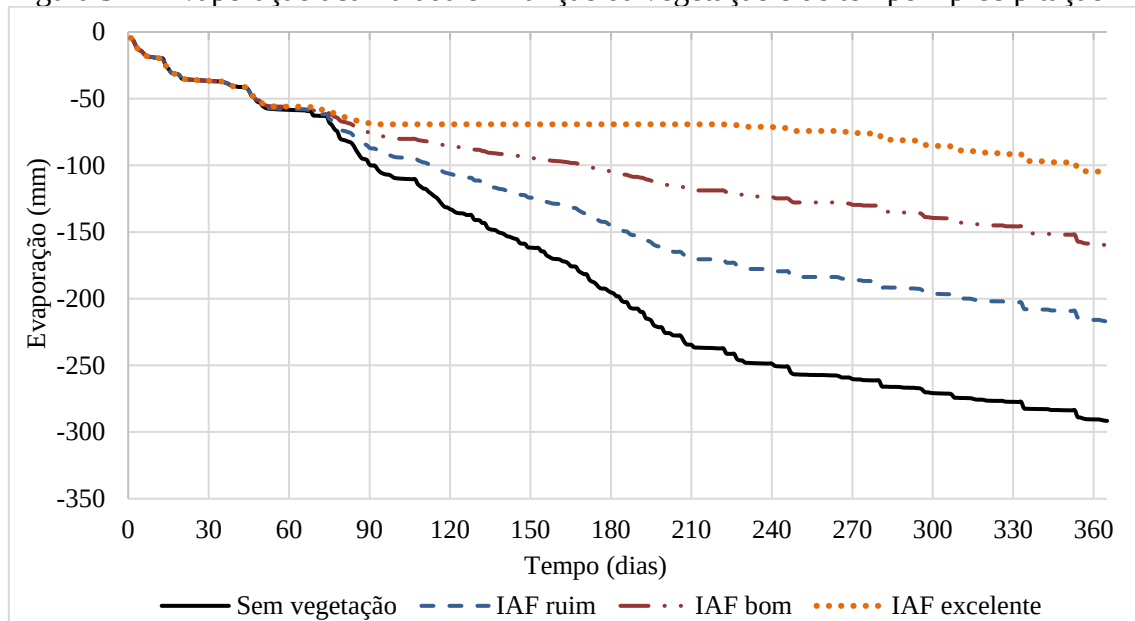
Fonte: Autor (2021).

Figura 30 – Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação média.



Fonte: Autor (2021).

Figura 31 – Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação mínima.



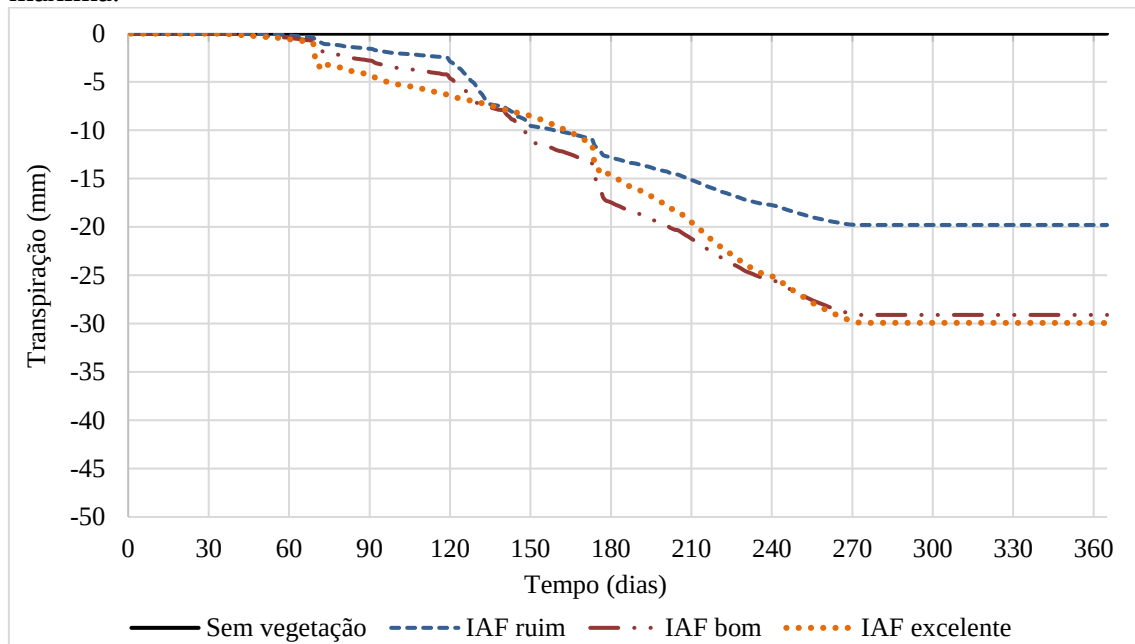
Fonte: Autor (2021).

Como esperado, à medida que se aumentou o IAF, houve um incremento do volume de transpiração realizado pela vegetação da camada de cobertura para as três condições de precipitação analisadas (Figuras 32, 33 e 34). Foi possível observar, ademais, que os maiores volumes transpirados foram verificados na condição de precipitação média, alcançando 46,931 mm para o IAF excelente.

Considerando o regime de precipitação anual sob condições de vegetação com IAF bom, o volume de líquido liberado por transpiração foi maior na condição de precipitação média, em que se espera situação de maior equilíbrio entre o volume de precipitação e a quantidade de radiação solar suficiente para fomentar o processo de transpiração das plantas. O ano de menor precipitação, por sua vez, apresentou os menores volumes de transpiração.

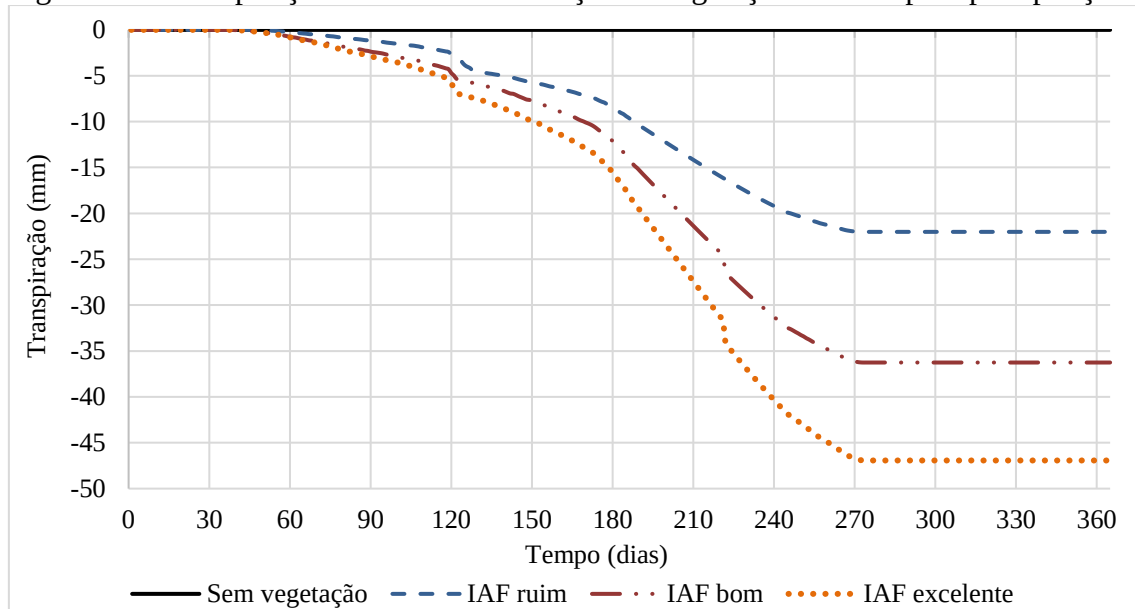
Por fim, verifica-se que o aumento do IAF gerou uma diminuição do volume de evapotranspiração (Tabela 14). Isso deve-se ao fato de que, sendo a evapotranspiração função da evaporação e da transpiração, a evaporação constitui, para as condições climáticas analisadas, o principal componente da evapotranspiração para a camada de cobertura, ainda que o incremento da cobertura vegetal tenha induzido a redução do volume deste componente do balanço hídrico.

Figura 32 – Transpiração acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação máxima.



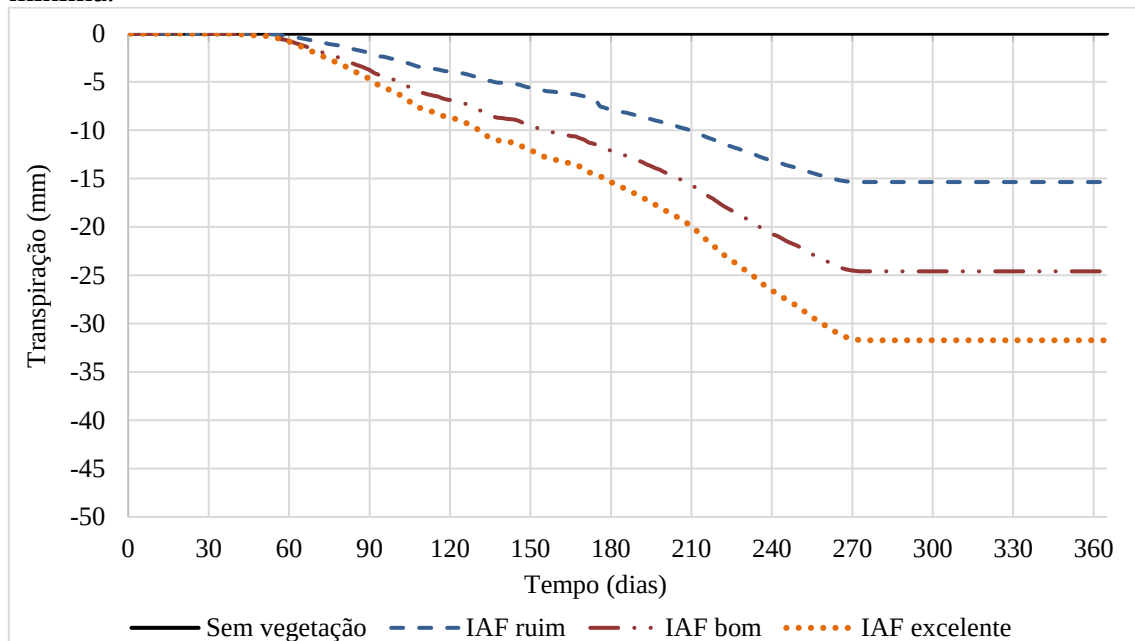
Fonte: Autor (2021).

Figura 33 – Transpiração acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação média.



Fonte: Autor (2021).

Figura 34 – Transpiração acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação mínima.



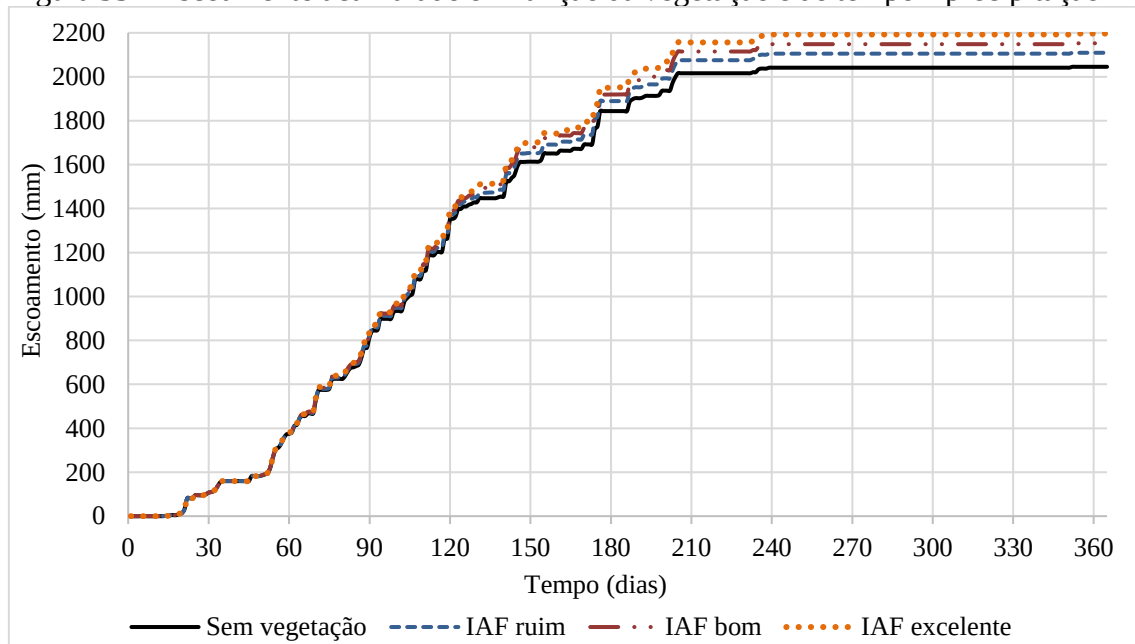
Fonte: Autor (2021).

O escoamento superficial foi influenciado pela variação do volume de precipitação anual e pelas condições de cobertura vegetal propostas. Verificou-se que os maiores volumes de precipitação anual e o incremento da cobertura vegetal implicaram maiores volume de escoamento superficial na camada de cobertura (Figuras 35, 36 e 37).

Considerando a condição de precipitação média, a cobertura vegetal com IAF ruim, bom e excelente implicaram incremento percentual de 4,11, 7,32 e 10,10% em relação à camada sem vegetação. A influência do IAF foi ainda maior na condição de precipitação mínima, apresentando, para o IAF excelente, um aumento de 25% do escoamento superficial em relação à cobertura sem vegetação.

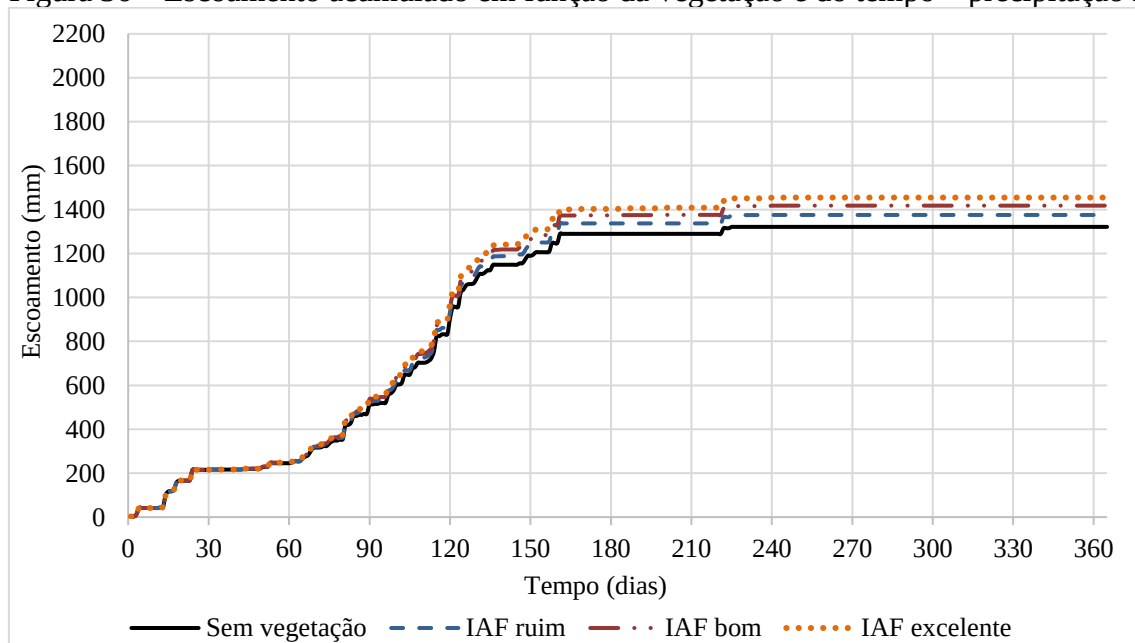
Observou-se que maiores volumes de precipitação anual implicaram maiores volumes de escoamento superficial na camada de cobertura. Nota-se a existência de significativa diferença entre os volumes acumulados de escoamento superficial. A condição de precipitação máxima apresenta volume de escoamento 50,8% superior ao observado na condição de precipitação média. Já na condição de precipitação mínima, o volume de escoamento é 49% inferior.

Figura 35 – Escoamento acumulado em função da vegetação e do tempo – precipitação máxima.



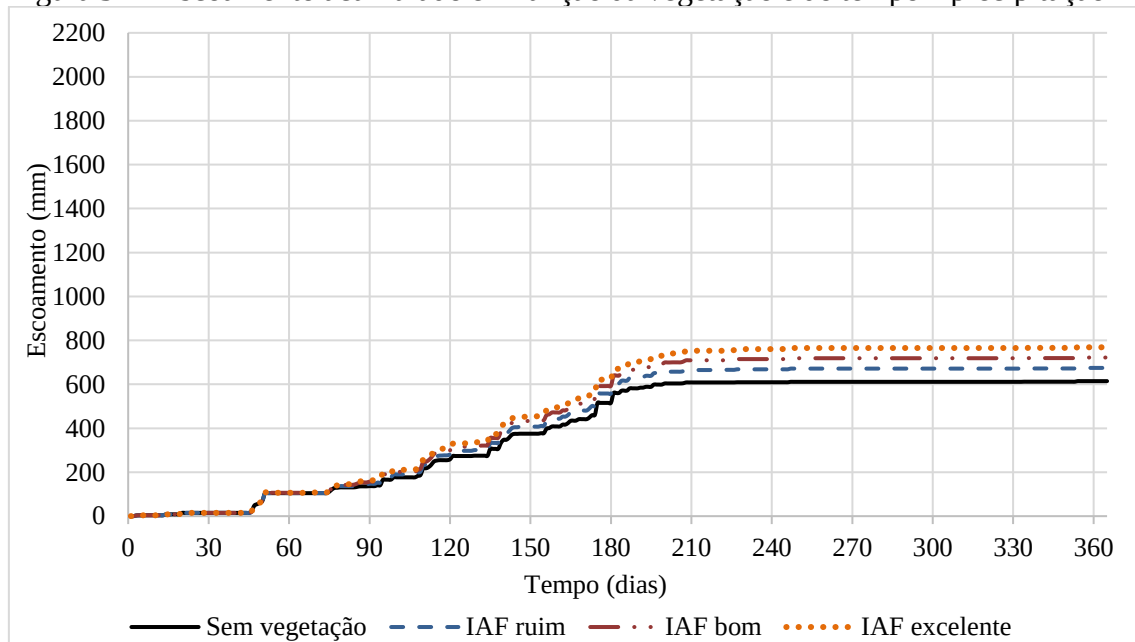
Fonte: Autor (2021).

Figura 36 – Escoamento acumulado em função da vegetação e do tempo – precipitação média.



Fonte: Autor (2021).

Figura 37 – Escoamento acumulado em função da vegetação e do tempo – precipitação mínima.



Fonte: Autor (2021).

Não se verificou influência do incremento do IAF no volume acumulado de água armazenada ao longo do tempo, apresentando variações inferiores a 1% nas situações com e sem vegetação (Tabela 14). O armazenamento de água na camada apresentou discreta variação em função do volume de precipitação anual; a condição de IAF excelente no ano de precipitação mínima foi 2,7% menor que a do ano de precipitação média com mesmo IAF, representando o maior percentual de diferença entre os volumes de água armazenada.

O armazenamento de água é distinto nos períodos chuvosos e secos do ano. Observou-se que, no período chuvoso, a camada de cobertura armazena até 86% do volume total de água armazenado durante o ano, enquanto no período seco apenas 4,8% do total.

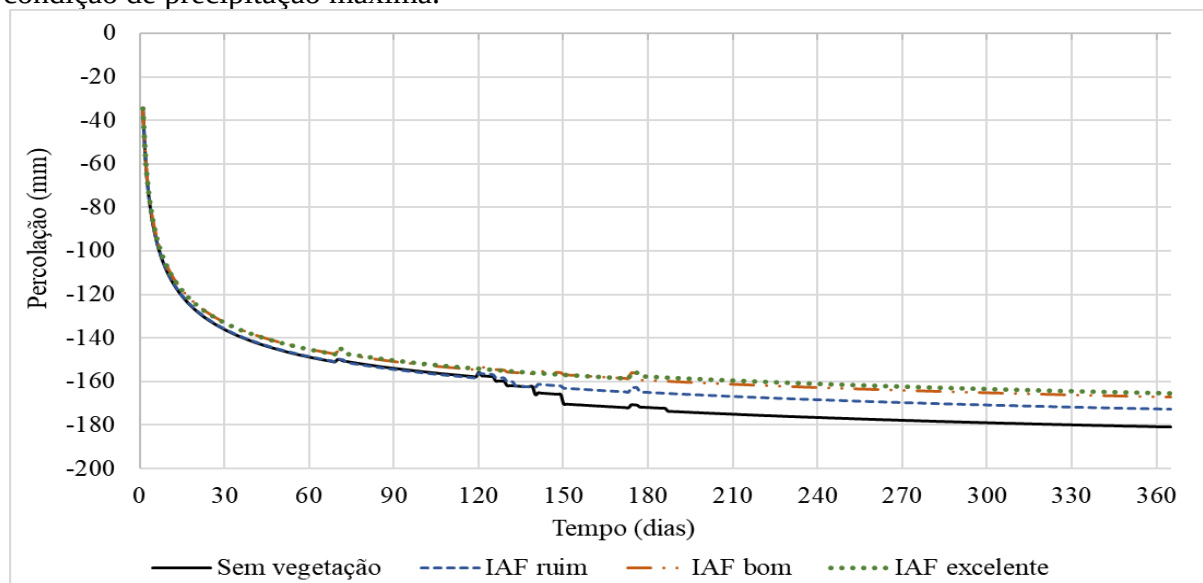
Verificou-se que o volume de fluidos percolado foi maior à medida que se elevou o volume de precipitação anual. O incremento do IAF, de maneira geral, representou diminuição da percolação pela camada de cobertura monolítica analisada e teve maior redução percentual nas condições de precipitação máxima e média.

Considerando-se a condição de precipitação média, a percolação representou em torno de 10% da precipitação anual acumulada. O incremento do IAF implicou redução do volume de percolação: 2,29% para o IAF ruim, 3,54% para o IAF bom e 6,50% para o IAF excelente, quando comparadas com a cobertura sem vegetação (Figura 39). Na condição de precipitação máxima, observou-se a tendência semelhante, de redução percentual de 4,38, 7,52 e 8,63%

para os IAF ruim, bom e excelente em relação à condição sem vegetação. Os índices de percolação em relação à precipitação foram em torno de 7,0 a 7,67% (Figura 38).

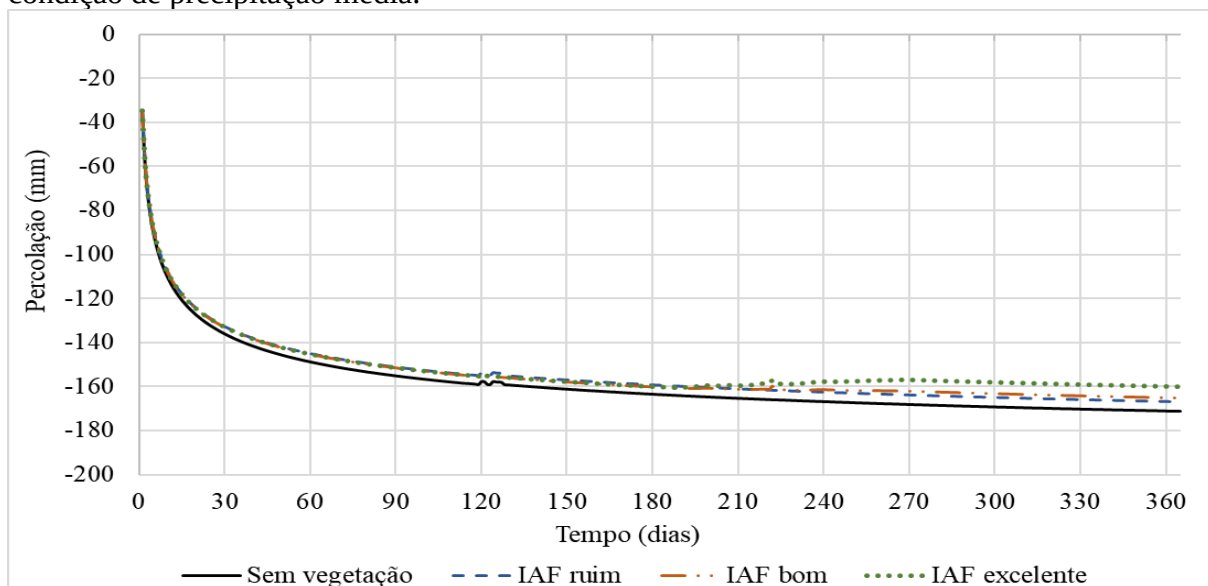
Na condição de precipitação mínima (Figura 40), por fim, a percolação apresenta os maiores índices em relação à precipitação anual – 18,78% para os IAF ruim e bom e 18,95% para os IAF bom e excelente. Contudo, não verificou-se tendência definida na influência do IAF na redução da percolação. Observou-se, por fim, que os volumes de percolação foram semelhantes para as três condições de precipitação anual analisadas (Tabela 14).

Figura 38 – Percolação acumulada em função da vegetação e do tempo, considerando a condição de precipitação máxima.



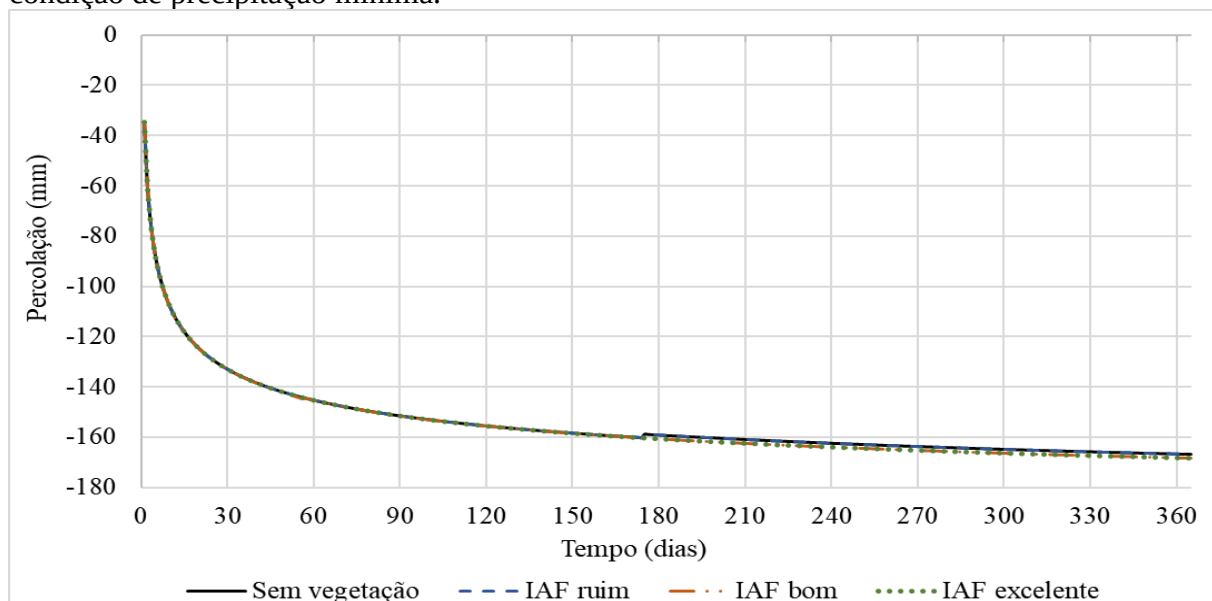
Fonte: Autor (2021).

Figura 39 – Percolação acumulada em função da vegetação e do tempo, considerando a condição de precipitação média.



Fonte: Autor (2021).

Figura 40 – Percolação acumulada em função da vegetação e do tempo, considerando a condição de precipitação mínima.



Fonte: Autor (2021).

Tabela 14 – Balanço hídrico do perfil A.

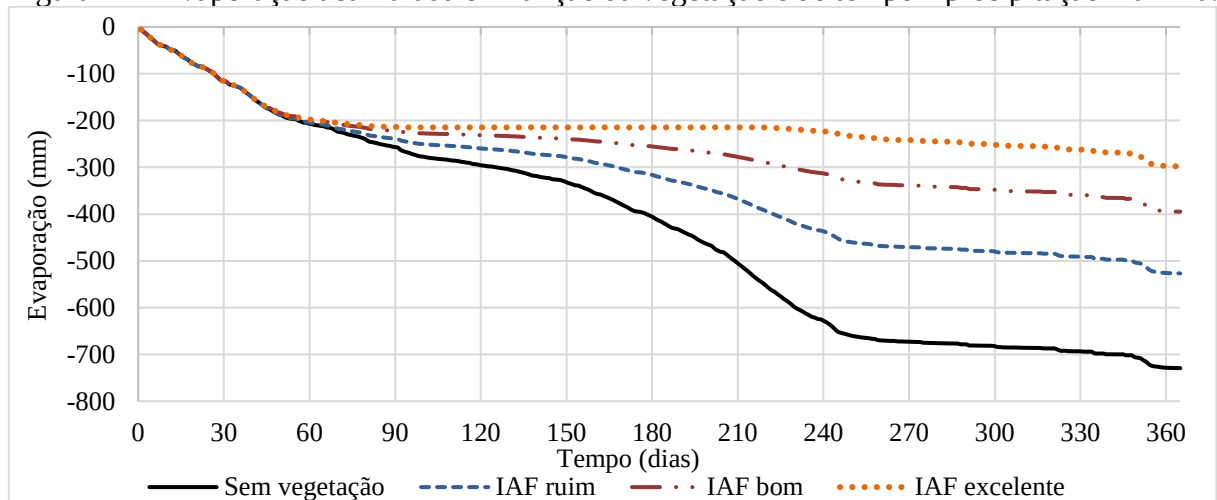
Perfil A - Solo ASMOC (0,4 m) + Resíduo (1,0 m)											
Precipitação máxima (2359,5 mm)											
Vegetação	EVP	(%)	T	(%)	ARM	(%)	ESC	(%)	PERC	(%)	Erro (%)
Sem vegetação	-322,014	-13,648	0,000	0,000	-188,779	-8,001	2045,422	86,689	-180,843	-7,664	0,352
IAF Ruim	-245,769	-10,416	-19,791	-0,839	-188,248	-7,978	2109,298	89,396	-172,891	-7,327	0,014
IAF Bom	-195,868	-8,301	-29,097	-1,233	-185,117	-7,846	2152,407	91,223	-167,245	-7,088	-0,056
IAF Excelente	-152,084	-6,446	-28,269	-1,198	-184,347	-7,813	2196,588	93,095	-166,907	-7,074	-0,071
Precipitação média (1602,3 mm)											
Vegetação	EVP	(%)	T	(%)	ARM	(%)	ESC	(%)	PERC	(%)	Erro (%)
Sem vegetação	-298,586	-18,635	0,000	0,000	-188,541	-11,767	1321,195	82,456	-171,060	-10,676	-0,092
IAF Ruim	-226,210	-14,118	-22,014	-1,374	-188,540	-11,767	1375,480	85,844	-167,136	-10,431	-0,089
IAF Bom	-174,913	-10,916	-36,255	-2,263	-191,712	-11,965	1417,842	88,488	-165,002	-10,298	-0,222
IAF Excelente	-132,300	-8,257	-46,931	-2,929	-191,559	-11,955	1454,679	90,787	-159,950	-9,982	-0,537
Precipitação mínima (887,9 mm)											
Vegetação	EVP	(%)	T	(%)	ARM	(%)	ESC	(%)	PERC	(%)	Erro (%)
Sem vegetação	-291,593	-32,841	0,000	0,000	-185,047	-20,841	614,604	69,220	-166,750	-18,780	-0,207
IAF Ruim	-216,967	-24,436	-15,354	-1,729	-185,991	-20,947	674,786	75,998	-166,784	-18,784	-0,204
IAF Bom	-159,867	-18,005	-24,589	-2,769	-186,873	-21,047	722,081	81,325	-168,236	-18,948	-0,040
IAF Excelente	-105,745	-11,910	-31,722	-3,573	-186,468	-21,001	768,626	86,567	-168,275	-18,952	-0,036

Fonte: Autor (2021).

4.2.2 Perfil B

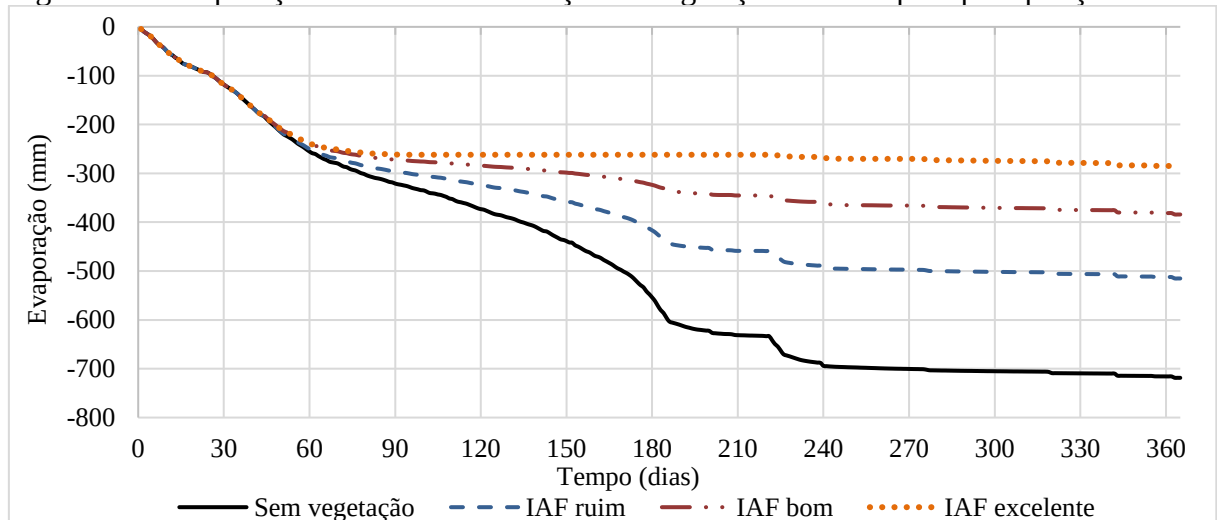
O volume acumulado de água liberado por evaporação no diminuiu com o aumento do IAF, assim como no perfil A. A adoção do IAF excelente, por exemplo, representou diminuição de até 66,6% em relação à camada de cobertura sem vegetação na condição de precipitação mínima. Verificou-se, ainda, que os valores de evaporação são maiores no ano de precipitação mínima para as condições sem vegetação e com vegetação de IAF ruim e maiores no ano de precipitação máxima para os IAF bom e excelente (Figuras 41, 42 e 43).

Figura 41 – Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação máxima.



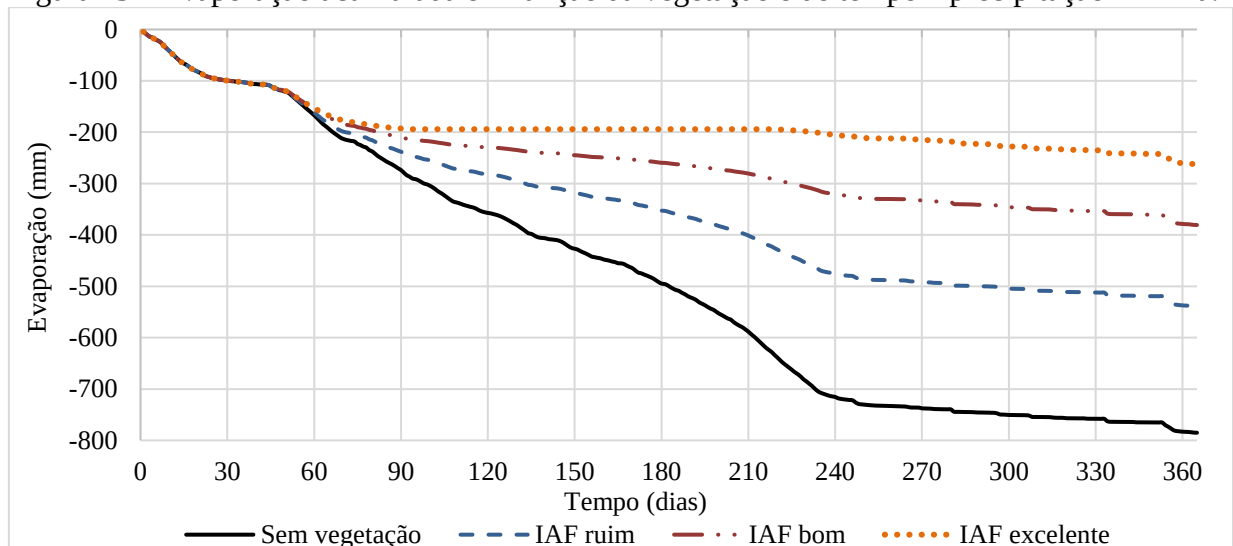
Fonte: Autor (2021).

Figura 42 – Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação média.



Fonte: Autor (2021).

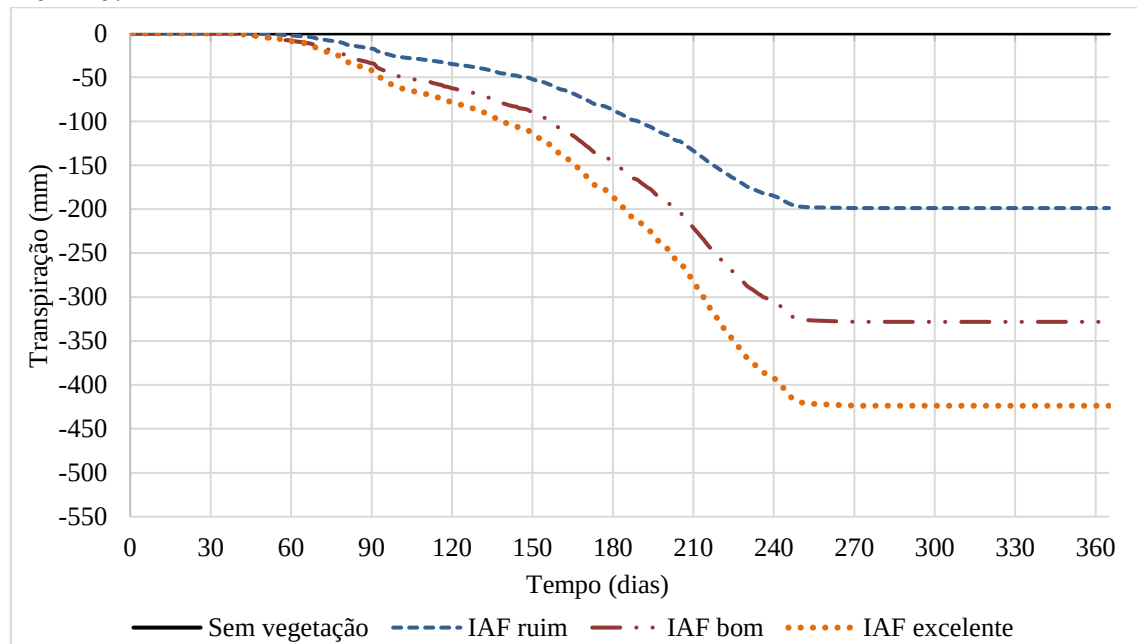
Figura 43 – Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação mínima.



Fonte: Autor (2021).

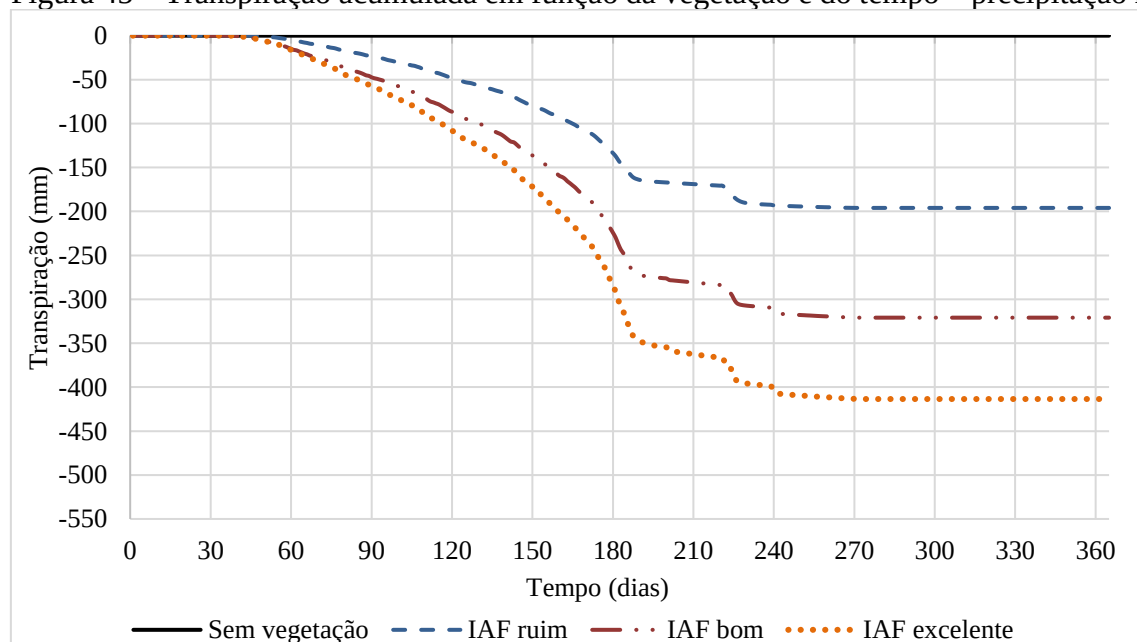
Os volumes de transpiração foram superiores aos observados no perfil A, sendo mais significativos na condição de menor precipitação anual. Ao adotar-se a cobertura com o IAF excelente, foi possível observar que o volume de transpiração superou o volume de evaporação, tornando-se a parcela mais importante da evapotranspiração, o que não verificado no perfil A (Figuras 44, 45 e 46).

Figura 44 – Transpiração acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação máxima.



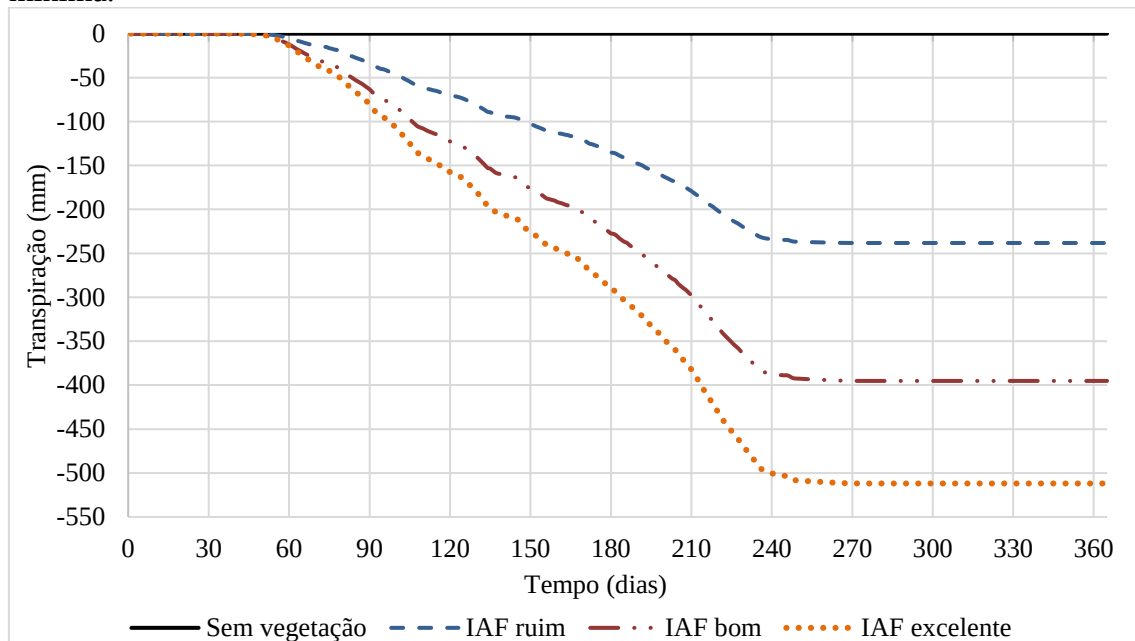
Fonte: Autor (2021).

Figura 45 – Transpiração acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação média.



Fonte: Autor (2021).

Figura 46 – Transpiração acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação mínima.



Fonte: Autor (2021).

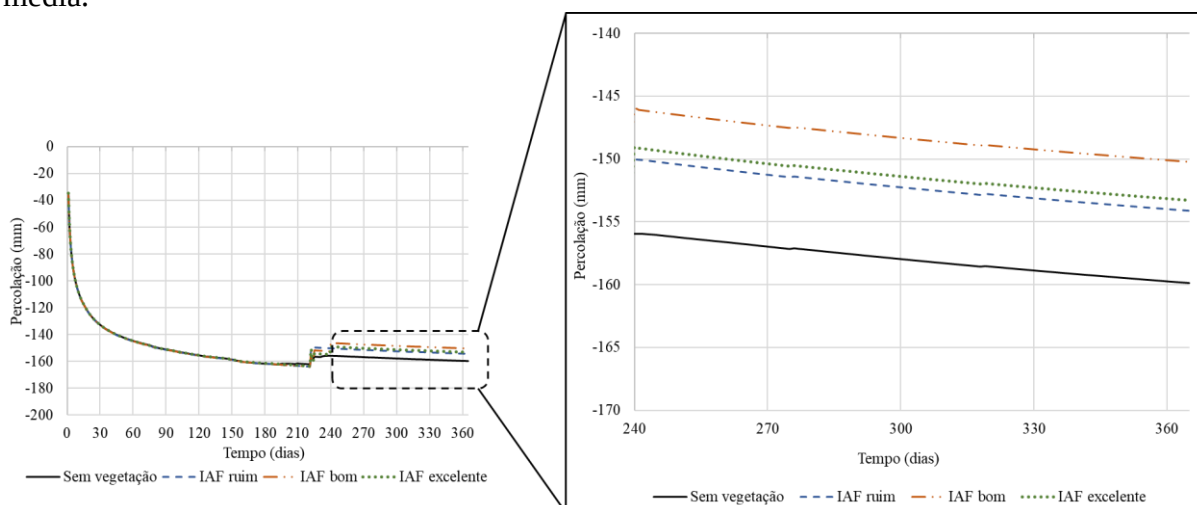
O volume de água armazenado foi superior ao observado no perfil A e, nas condições de precipitação máxima e mínima, apresentaram tendência constante com o incremento da cobertura vegetal. Na condição de precipitação média, observou-se que o aumento do IAF para excelente indicou volume 3,4% maior do que o observado na condição sem vegetação.

O escoamento superficial aumentou com o incremento do IAF, mas em percentuais menores do que os observados no perfil A. A adoção da cobertura vegetal com IAF excelente nas condições de precipitação mínima, por exemplo, propiciou um aumento no escoamento de 6,8% em relação à cobertura sem vegetação (Tabela 15).

As coberturas submetidas a maiores volumes de precipitação anual apresentaram maiores volumes de escoamento superficial. Foi possível constatar a influência da precipitação sobre o volume de escoamento através da discrepância entre o escoamento da condição de precipitação mínima, que representaram apenas 20% do observado no período de precipitação média.

As percolações observadas nas condições de precipitação máxima e mínima apresentaram tendência constante. Na condição de precipitação média, observou-se, entretanto, redução de 6,1% no volume de percolação com adoção do IAF bom em relação à camada sem vegetação (Figura 47).

Figura 47 – Percolação anual acumulado em função da vegetação e do tempo – precipitação média.



Fonte: Autor (2021).

Tabela 15 – Balanço hídrico do perfil B.

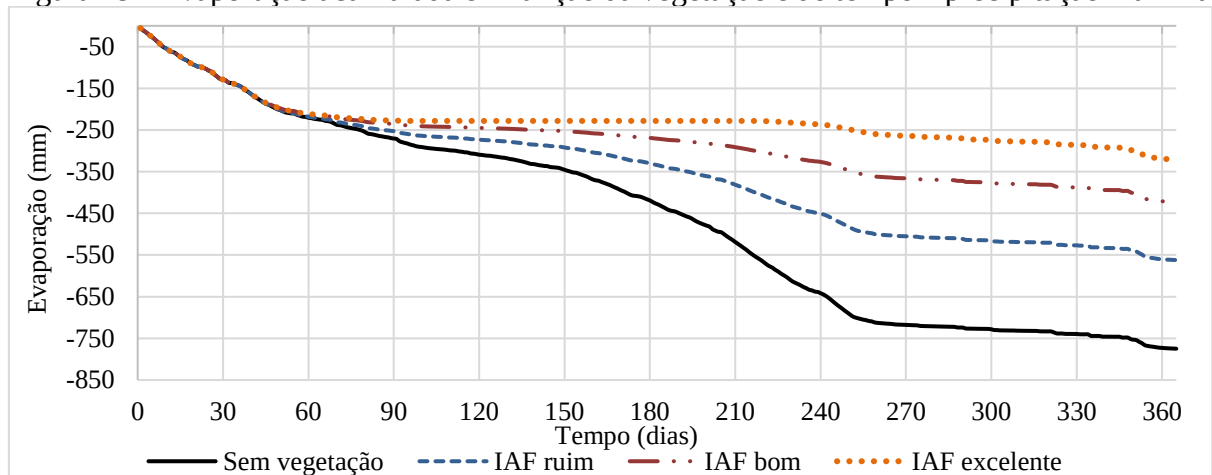
Perfil B - Top Soil (0,3 m) + Argila (0,3 m) + Resíduo (1,0 m)											
Precipitação máxima (2359,5 mm)											
Vegetação	EVP	(%)	T	(%)	ARM	(%)	E	(%)	PERC	(%)	Erro (%)
Sem vegetação	-729,306	-30,909	0,000	0,000	-233,539	-9,898	1701,668	72,120	-162,066	-6,869	-0,267
IAF Ruim	-526,828	-22,328	-198,768	-8,424	-233,571	-9,899	1705,020	72,262	-162,455	-6,885	-0,251
IAF Bom	-394,948	-16,739	-328,240	-13,911	-233,577	-9,899	1707,454	72,365	-162,436	-6,884	-0,251
IAF Excelente	-298,069	-12,633	-423,716	-17,958	-233,570	-9,899	1709,214	72,440	-162,071	-6,869	-0,267
Precipitação média (1602,3 mm)											
Vegetação	EVP	(%)	T	(%)	ARM	(%)	E	(%)	PERC	(%)	Erro (%)
Sem vegetação	-718,653	-44,851	0,000	0,000	-233,587	-14,578	957,380	59,750	-159,854	-9,977	-0,490
IAF Ruim	-515,209	-32,154	-196,038	-12,235	-239,733	-14,962	976,677	60,955	-154,109	-9,618	-0,848
IAF Bom	-384,204	-23,978	-320,941	-20,030	-240,859	-15,032	987,794	61,648	-150,221	-9,375	-1,091
IAF Excelente	-287,688	-17,955	-413,508	-25,807	-241,410	-15,066	989,236	61,739	-153,278	-9,566	-0,900
Precipitação mínima (887,9 mm)											
Vegetação	EVP	(%)	T	(%)	ARM	(%)	E	(%)	PERC	(%)	Erro (%)
Sem vegetação	-785,091	-88,421	0,000	0,000	-236,907	-26,682	194,134	21,864	-145,582	-16,396	-2,512
IAF Ruim	-539,282	-60,737	-238,236	-26,831	-236,308	-26,614	197,760	22,273	-148,929	-16,773	-2,135
IAF Bom	-380,701	-42,877	-395,191	-44,509	-237,225	-26,718	201,801	22,728	-147,432	-16,605	-2,304
IAF Excelente	-262,359	-29,548	-511,919	-57,655	-238,064	-26,812	207,257	23,342	-144,430	-16,266	-2,642

Fonte: Autor (2021).

4.2.3 Perfil C

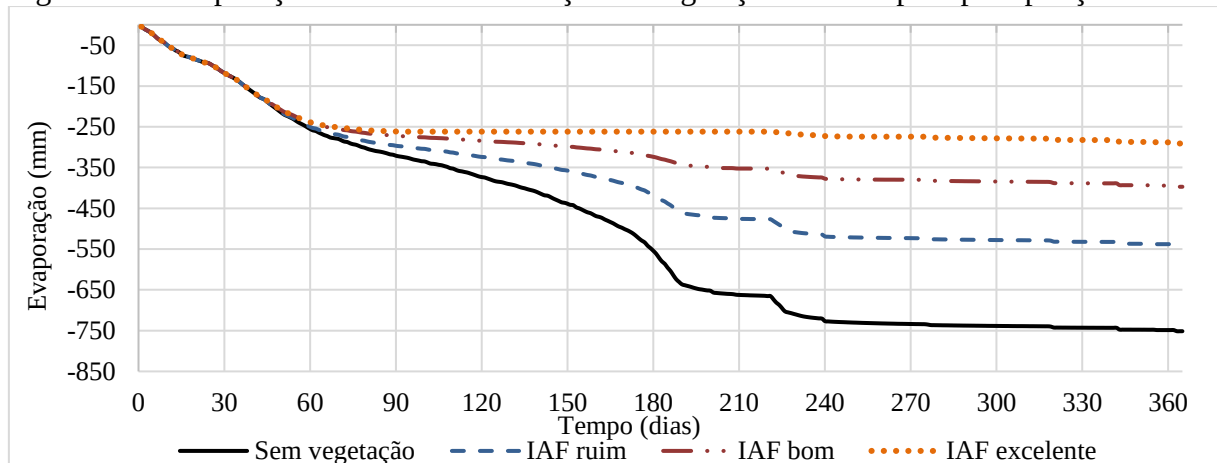
Assim como nos perfis A e B, a evaporação diminuiu com o aumento do IAF, apresentando reduções de até 65,8% quando se comparam as situações de IAF excelente e sem vegetação do ano de precipitação mínima (Figuras 48, 49 e 50). A transpiração, por sua vez, aumentou à medida que se elevou o IAF, com maiores valores observados na condição de precipitação mínima (Tabela 16).

Figura 48 – Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação máxima.



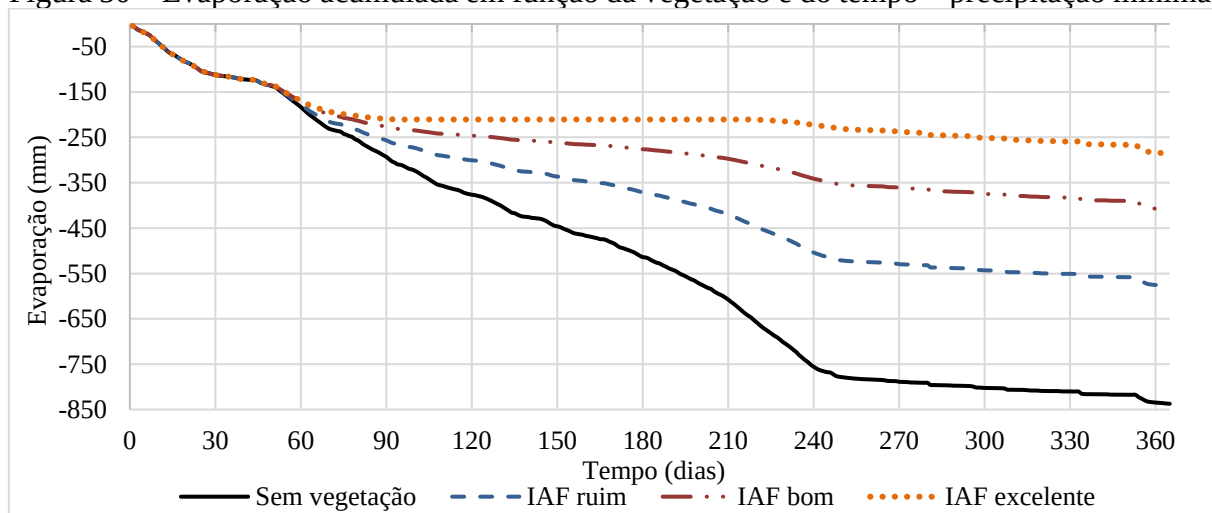
Fonte: Autor (2021).

Figura 49 – Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação média.



Fonte: Autor (2021).

Figura 50 – Evaporação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação mínima.



Fonte: Autor (2021).

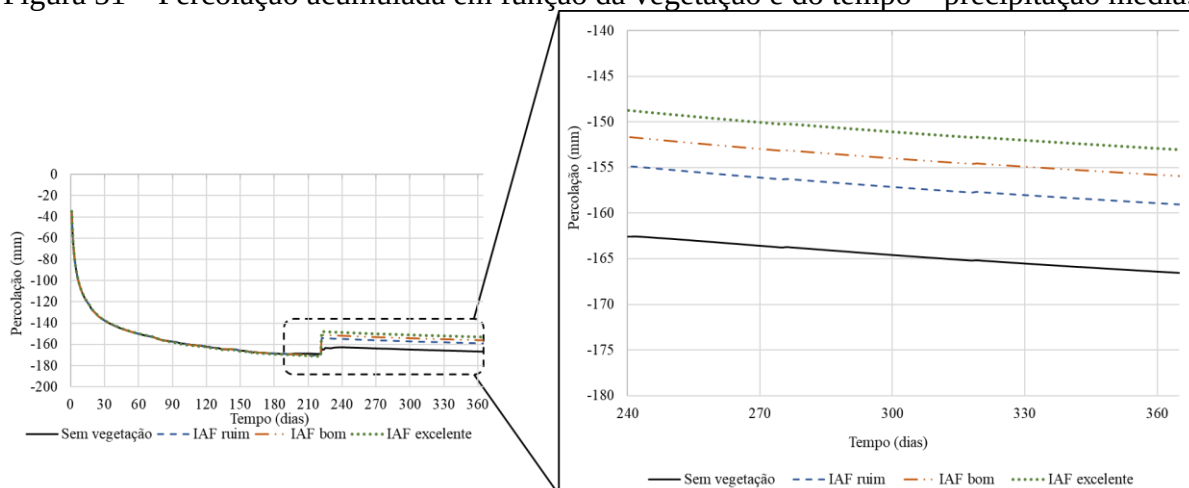
O volume de água armazenada na camada de cobertura foi superior aos observados nos perfis A e B. Assim como no perfil B, nas condições de precipitação máxima e mínima os

volumes de água armazenada mostraram tendência constante. Na condição de precipitação média, houve aumento de 3,4% em relação à cobertura sem vegetação quando se adotou o IAF excelente (Tabela 16).

O escoamento superficial, assim como nos perfis A e B, aumentou com o incremento do IAF e apresentou maiores volumes quando a cobertura foi submetida a condições de maiores volumes de precipitação (Tabela 16).

A percolação apresentou tendência constante nas condições de precipitação máxima e mínima com a variação do IAF. Na condição de precipitação média, ao adotar-se o IAF excelente, houve uma redução percentual de 6,5% no volume de percolação anual.

Figura 51 – Percolação acumulada em função da vegetação e do tempo – precipitação média.



Fonte: Autor (2021).

Tabela 16 – Balanço hídrico do perfil C.

Perfil C - Top Soil (0,3 m) + Camada de drenagem (0,3 m) + Argila (0,3 m) + Resíduo (1,0 m)											
Precipitação máxima (2359,5 mm)											
Vegetação	EVP	(%)	T	(%)	ARM	(%)	E	(%)	PERC	(%)	Erro (%)
Sem vegetação	-774,835	-32,839	0,000	0,000	-255,642	-10,835	1672,641	70,890	-167,666	-7,106	-0,205
IAF Ruim	-562,095	-23,823	-209,352	-8,873	-255,647	-10,835	1677,710	71,104	-165,990	-7,035	-0,277
IAF Bom	-422,906	-17,924	-346,187	-14,672	-255,637	-10,834	1679,140	71,165	-166,904	-7,074	-0,238
IAF Excelente	-320,807	-13,596	-446,716	-18,933	-255,623	-10,834	1680,875	71,239	-166,725	-7,066	-0,245
Precipitação média (1602,3 mm)											
Vegetação	EVP	(%)	T	(%)	ARM	(%)	E	(%)	PERC	(%)	Erro (%)
Sem vegetação	-751,503	-46,901	0,000	0,000	-257,315	-16,059	941,563	58,763	-166,550	-10,394	-0,371
IAF Ruim	-540,858	-33,755	-215,665	-13,460	-262,743	-16,398	949,481	59,257	-159,039	-9,926	-0,840
IAF Bom	-397,241	-24,792	-357,934	-22,339	-264,903	-16,533	956,101	59,671	-155,927	-9,731	-1,034
IAF Excelente	-291,120	-18,169	-465,897	-29,077	-266,051	-16,604	958,271	59,806	-153,063	-9,553	-1,212
Precipitação mínima (887,9 mm)											
Vegetação	EVP	(%)	T	(%)	ARM	(%)	E	(%)	PERC	(%)	Erro (%)
Sem vegetação	-837,181	-94,288	0,000	0,000	-259,861	-29,267	159,636	17,979	-150,944	-17,000	-2,432
IAF Ruim	-578,051	-65,103	-252,207	-28,405	-260,174	-29,302	165,798	18,673	-152,018	-17,121	-2,311
IAF Bom	-409,788	-46,153	-416,974	-46,962	-260,271	-29,313	169,824	19,126	-151,585	-17,072	-2,360
IAF Excelente	-286,278	-32,242	-537,979	-60,590	-260,290	-29,315	172,525	19,431	-151,408	-17,052	-2,379

Fonte: Autor (2021).

4.2.4 Considerações gerais sobre o balanço hídrico dos sistemas de cobertura

Verificou-se que o volume de evaporação anual das coberturas foi influenciado tanto pelas condições de vegetação, quanto pelas condições de precipitação. O perfil A mostrou-se como o que tem menor potencial evaporativo, apresentando volumes não superiores a 322 mm. Os perfis B e C apresentaram, por sua vez, maiores volumes de evaporação (alcançando até 785 e 837 mm, respectivamente). A adoção da camada de *Top soil* como revestimento, com maior permeabilidade que a areia argilosa, pode ser uma das causas desse comportamento.

As transpirações, como esperado, foram superiores nas condições de maior IAF. Observou-se, entretanto, uma discrepância entre os volumes transpirados do perfil A em relação aos perfis B e C, que foram bastante superiores, indicando que o solo da camada superficial (*Top soil*) induz melhores condições para o processo de transpiração da vegetação.

Diferentemente do que ocorre em camadas de coberturas evapotranspirativas, em que a transpiração é a principal parcela da evapotranspiração (DIRMEYER *et al.*, 2006; LAWRENCE *et al.*, 2011; CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015), os sistemas de coberturas secas estudados indicaram como principal parcela a evaporação, salvo na condição de vegetação com IAF excelente, em que para todas as situações de precipitação, o volume transpirado foi superior ao evaporado.

O armazenamento de água nos sistemas de cobertura analisados não sofreu alterações substanciais com o aumento do IAF, mas apresentaram crescimento com o aumento do volume de precipitação anual.

O escoamento superficial, por sua vez, foi influenciado diretamente pelo aumento do IAF e do volume de precipitação anual. Observou-se que a vegetação teve maior influência no aumento do escoamento na condição de precipitação mínima em todos os perfis analisados. A adoção da cobertura com IAF excelente aumentou 25% o escoamento em relação à cobertura sem vegetação, na condição de precipitação mínima do perfil A.

As folhas das plantas são responsáveis pela maior interceptação das precipitações. A interceptação e a condutividade hidráulica do solo dependem do percentual de cobertura vegetal (SAJJAN; GYASI-AGYEI; SHARMA, 2013). Dessa maneira, o tipo de vegetação influencia na quantidade de chuva que cada folha pode reter (BELTRAME, 1994) e, conseqüentemente, no comportamento do escoamento superficial. A tendência de aumento do volume de escoamento verificada nas modelagens numéricas realizadas deve ser considerada com cautela,

visto que a literatura (BELTRAME, 1994; BLANCO; LAL, 2008; SAJJAN; GYASI-AGYEI; SHARMA, 2013; NOBREGA, 2014; FARIAS *et al.*, 2019) aponta para tendência contrária: a presença de vegetação implica a diminuição do índice de escoamento em camadas de solo.

Modelagens numéricas realizadas com o auxílio de diversos *softwares* que simulam o fluxo evapotranspirativo e o balanço hídrico de coberturas apontaram limitações na previsão dos componentes do balanço hídrico, inclusive o escoamento superficial. Khire *et al.* (1997) realizaram modelagens numérica com o *software* UNSAT-H para coberturas submetidas a condições climáticas de Atlanta, Georgia e Washigton considerando o período de três anos, identificando um subdimensionamento dos valores de percolação e um superdimensionamento do escoamento superficial. Khire *et al.* (1999), com o mesmo *software*, verificaram, para modelagem de uma barreira capilar (15 cm silte acima de 75 cm de areia), um subdimensionamento da ordem de 100 mm e um superdimensionamento da percolação de até 50 mm.

Destaca-se, entre as alterações promovidas pela adoção de cobertura vegetal na camada de cobertura, o potencial de redução da percolação. Observou-se, no perfil A, que a adoção do IAF excelente implicou redução do volume percolado de 8,6 e 6,5% em relação às coberturas sem vegetação nas condições de precipitação máxima e média. No perfil B, o IAF excelente na condição de precipitação média induziu a redução de 4,1%. Por fim, no perfil C, a redução observada foi de 8,1% para as mesmas condições de precipitação e vegetação do perfil B.

Apesar dos estudos sobre a influência da vegetação serem direcionados para coberturas evapotranspirativas e respeitando as particularidades dos estudos, a tendência de redução do volume de percolação a partir do aumento do IAF verificada neste estudo é também indicada por Zhang e Sun (2014), que observaram redução de percolação de cerca de 60,43 e 83,3%, a partir da variação do IAF de 1,0 a 3,0 em uma camada de cobertura monolítica de 600 e 800 mm de espessura em região de clima úmido da Ásia, com regime de precipitação de 1000 mm anuais, obtendo até 88,3% de redução para IAF 5,0.

Roesler; Benson e Albright (2002) verificaram uma redução de percolação de aproximadamente 40,79% com variação de IAF entre 0,5 a 3,0, alcançando 71,10% para IAF 5,0, para camada monolítica de 2910 mm de espessura em condições climáticas de semiárido, com precipitação anual de 587 mm.

O volume de percolação apresentou relação com o volume de precipitação anual, sendo maior para a condição de precipitação máxima dos três perfis. Foi possível verificar, ainda, que o incremento do número de camadas representou, como esperado, uma diminuição dos volumes de percolação sob as diferentes condições de vegetação.

De maneira geral, considerando-se a mesma condição de precipitação e de IAF, observou-se que, quanto à evaporação e à transpiração, que os perfis B e C apresentaram volumes superiores aos observados no perfil A, o que pode ser atribuído às características de condutividade hidráulica e de volume de vazios do solo de revestimento, podendo ser considerado mais adequado ao desenvolvimento das raízes e implicando condições mais favoráveis aos processos biológicos da vegetação.

O volume de água armazenada, como esperado, foi superior no perfil C, que foi o sistema de cobertura constituído por mais camadas (*Top soil*, drenagem e argila), seguido do perfil B (*Top soil* e argila) e do perfil A (areia argilosa). O escoamento superficial, por sua vez, foi superior no perfil A, o que pode ser atribuído à condutividade hidráulica do solo (areia argilosa) ser inferior aos dos demais perfis (*Top soil*). Por fim, os maiores volumes de percolação foram verificados no perfil A.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A compreensão do comportamento de sistemas de coberturas secas ainda se configura como desafio, na medida em que diversos fatores influenciam seu desempenho, como a espessura das camadas, as características geotécnicas (granulometria, índice de vazios, grau de compactação), hidráulicas (sucção e condutividade hidráulica) e físico-químicas (pH e matéria orgânica) dos solos que as compõem, as condições climáticas (precipitação, radiação solar, temperatura, velocidade dos ventos e umidade relativa do ar) e de vegetação (índice de área foliar, capacidade de campo, ponto de murcha).

Este trabalho analisou a influência da vegetação por meio da variação do IAF e das condições de precipitação para três sistemas de coberturas secas submetidas a condições climáticas do Nordeste brasileiro, utilizando-se de modelagens numéricas realizadas com auxílio do *software* VADOSE/W.

Quanto ao estudo da saturação, considerou-se a condição de precipitação média e a cobertura sem e com vegetação de IAF bom. Observou-se, assim, que o perfil A, constituído de uma camada de areia argilosa de 0,4 m, com função impermeabilizante, não foi capaz de constituir efetiva barreira ao fluxo de oxigênio para o interior da camada de resíduos, apresentando saturações inferiores aos 85%, representando condição favorável à entrada de oxigênio e, por conseguinte, à oxidação do metano derivado da biodegradação dos resíduos, constituindo, assim, uma situação indicada para aterros em que não haja o aproveitamento do biogás e seja preferível a produção e liberação do CO₂ ao CH₄, composto com maior potencial poluente.

O perfil B alcançou a saturação acima de 85% para os 25 cm mais superficiais de solo de cobertura a partir do dia 72 e 100% de saturação a partir do dia 79. Os níveis de saturação permaneceram acima dos 85% até o dia 168, representando uma condição ideal de limitação de entrada de oxigênio durante 26% do ano e promovendo, assim, uma situação favorável à produção do gás metano, principal componente do biogás.

O perfil C, por fim, apresentou uma condição ideal de limitação da entrada de oxigênio nos 30 cm superficiais da camada de *Top soil* entre os dias 69 e 170, o que representa 27,7% do ano analisado. A adoção de uma cobertura vegetal de IAF bom implicou, de maneira geral, a redução da saturação nos sistemas de coberturas, sendo sua influência mais pertinente no perfil A e no período seco do ano.

Quanto aos componentes do balanço hídrico, a evaporação mostrou-se sensível às diferentes condições de vegetação e precipitação. O perfil A mostrou-se como o que tem menor potencial evaporativo em relação aos perfis B e C. A evaporação foi a principal componente da evapotranspiração das camadas de cobertura, salvo para os perfis B e C quando nas condições de vegetação de IAF excelente.

O aumento do IAF, como esperado, implicou o aumento do volume de transpiração das plantas. Observou-se uma discrepância entre o volume do perfil A e os volumes dos perfis B e C, podendo-se atribuir tal fenômeno às melhores condições do solo superficial dos perfis B e C em relação à areia argilosa de baixa permeabilidade empregada no perfil A.

O escoamento superficial apresentou relação direta com a vegetação e com a precipitação, tendo seu volume aumentado com o incremento da cobertura vegetal e do volume de precipitação anual. A análise desse componente do balanço hídrico deve ser considerado com ressalvas, visto que a tendência observada por estudos em campo é contrária, no sentido de que a vegetação implica uma redução do escoamento superficial devido à interceptação e absorção da água da chuva pelas folhas da vegetação. O armazenamento de água, por sua vez, não sofreu alterações substanciais com o aumento do IAF, mas apresentou crescimento com o aumento do volume de precipitação anual.

Por fim, o incremento do IAF implicou a redução do volume de líquidos percolados no sistema de coberturas analisados em quatro situações, representando uma redução de até 8,6% da percolação em relação à camada de cobertura sem vegetação, implicando, assim, em ganhos ambientais com a redução do líquido poluente e, consequentemente, auxiliando na mitigação da contaminação do solo subjacente e das águas subterrâneas e superficiais pelo líquido percolado, além de diminuir às solicitações sobre os sistemas de tratamento de lixiviado.

REFERÊNCIAS

- ALBRIGHT, W. H.; BENSON, C. H.; WAUGH, W. J. **Water balance covers for waste containment principles and practice**. American Society of Civil Engineers (ASCE). ISBN 978-0-7844-1070-7. Virginia, 2010.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Cropevapotranspiration: guidelines of computing crop water requiriments**. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56. 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D5298: **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper**. West Conshohocken, PA, USA, 2016.
- AMORIM, N. R. **Avaliação do Desempenho de Sistemas de Cobertura na Mina Rio Paracatu Mineração (RPM)**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2008.
- ASNER, G. P.; SCURLOCK, J. M. O.; HICKE, J. A. **Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies**. Global Ecology and Biogeography, v. 12, p. 191 – 205, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS SÓLIDOS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS SÓLIDOS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2011/2012**. São Paulo, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004. **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10318. **Geossintéticos – Parte 1: Termos e definições**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13896. **Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8419. **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 1992.

BARNSWELL, K. D.; DWYER, D. F. **Two-year performance by evapotranspiration covers for municipal solid waste landfills in northwest Ohio.** Waste Management, Volume 32, Issue 12, pp. 2336-2341, 2012.

BARROS, M. C. **Avaliação de um Resíduo da Construção Civil Beneficiado como Material Alternativo para Sistema de Cobertura.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

BARROSO, I. M. **Avaliação da camada de cobertura de aterro de resíduos sólidos com a utilização do modelo SoilCover.** Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H. **Soil physics.** Wiley & Sons. Inc., 4 ed. London, 1972.

BE TTS, A. K. **Understanding hydrometeorology using global models.** Bulletin of American Meteorological Society, 85(11), 1673-1688, 2004.

BELTRAME, A. DA V. **Diagnóstico do meio físico de bacias hidrográficas: modelo e aplicação.** Florianópolis: Ed. da UFSC, 112 p., 1994.

BENSON, C.; ABICHO, T.; ALBRIGHT, W.; GEE, G.; ROESLER, A. **Field evaluation of alternative earthen final covers.** International Journal of Phytoremediation, 3(1): 105–127. 2001.

BICALHO, K.V.; ZNIDARCIC, D.; FLEUREAU, J. M. **Determination of water hydraulic conductivity functions of unsaturated soils.** 3 Asian Conference on Unsaturated soils, Beijing, China, v. I, pp. 445-450. 2007.

BLANCO, H.; LAL, R. **Principles of soil conservation and management.** New York: Springer, 2008.

BLANEY, H.F.; CRIDDLE, W.O. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data.** Washington, D.C.: Soil Conservation Service, 48 p. 1950.

BLIGHT, G. E. **Aspects of the capillary model for unsaturated soil.** Proceedings of the 7th Asian Reg. Conf. on S.M.F.E., v. 1, pp. 1–7, 1983.

BORGHETTI SOARES, A. **Modelagem numérica de coberturas secas sobre rejeitos de mineração de carvão.** RT003-2012-BE, 70p., 2012.

BORGHETTI SOARES, A.; POSSA, M. V.; SOUZA, V. P.; SOARES, P. S. M.; BARBOSA, M. C.; UBALDO, M. O.; BERTOLINO, A. V. F. A.; BORMA, L. S. **Design of a dry cover pilot test for acid mine drainage abatement in southern Brazil. Part 2: Pilot Unit Construction and Initial Monitoring.** Technical communication. Mine Water and the Environment v. 29(4), p. 277-284, 2010.

BORGHETTI SOARES, A.; SOARES, P. S. M.; POSSA, M. V.; SOUZA, V. P. **Modelagem numérica de coberturas secas aplicadas sobre rejeitos de mineração**. XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology. Goiânia, 2013.

BORGHETTI SOARES, A.; UBALDO, M. O.; SOUZA, V. P.; SOARES, P. S. M.; BARBOSA, M. C.; MENDONÇA, R. M. G. **Design of a dry cover pilot test for acid mine drainage abatement in southern Brazil. Part 1: material characterization and numeric modeling**. *Mine Water and the Environment* v. 28(3), p. 219-231, 2009.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. Oficina de Textos, 248p. São Paulo, 2008.

BOUAZZA, A., VAN IMPE, W. F. **Liner design for waste disposal sites**. *Environmental Geology*, Vol.35, No 1, 1998.

BRANDL, H. **Mineral liners for hazardous waste containment**. *Geotechnique* Vol. 42, No 1, pp.57-65. 1992.

BRASIL. **Lei nº 14.026/2020**. Atualiza o Marco legal do saneamento básico. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF, 15 jul. 2020.

BRASIL. **Lei nº. 12.305/10**. Dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos, regulamentada pelo Decreto 7.404/10. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF, 31 ago. 2010.

BREDA, N. J. J. **Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies**. *Journal of Experimental Botany*, v. 54, n. 392, p. 2403 – 2417, 2003.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR., G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C **Solos não saturados no contexto geotécnico**. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), 759 p. São Paulo, 2015.

CAO, Y.; STASZEWSKA, E. **Role of landfill cover in reducing methane emission**. *Archives of Environmental Protection*, v. 39, n. 3, p. 115-126, 2013.

CARUZZO, A.; ROCHA, H. R. **Estimativa do índice de área foliar (IAF) em regiões de pastagem e floresta com um método indireto ('gap fraction') durante o experimento AMC/LBA-1999**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro, RJ. Anais... p. 2478-2485. Rio de Janeiro, 2000.

CHOW, V.T. **Handbook of applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1964.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Resíduos Sólidos Industriais**. 2ª ed. São Paulo, 1993.

- COSTA, M. D. **Estudos de Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários em Colunas de Solos**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2015.
- CRUZ, P. T. D. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. Oficina de Textos, 1996.
- DANIEL, D. E.; KOERNER, R. M. **Cover Systems**. In: Daniel, D.E. (ed.) *Geotechnical Practice for Waste Disposal*, 1 ed., chapter 18, London, UK, Chapman & Hall, 1993.
- DIAS, G. A. **Água no Sistema Solo-Planta-Atmosfera**. VII Simpósio do Papaya Brasileiro. Produção e Sustentabilidade Hídrica. Vitória, Espírito Santo, 2018.
- DIRMEYER, P.A.; KOSTER, R.D.; GUO, Z. **Do global models properly represent the feedback between land and atmosphere?** *Journal of Hydrometeorologie*. 7, 1177–1198, 2006.
- DUARTE, J. P. **Análise do comportamento hídrico devido a sazonalidade em uma pilha de estéril de minério de ferro em solo não saturado**. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais, 2019.
- EDIL T. B.; MOTAN, S. E.; TOHA, F. X. **Mechanical behaviour and testing methods of unsaturated soil**. American Society for testing and Materials. Philadelphia, PA, n. 740, p. 114–129, 1981.
- EL-FADEL, M.; FINDIKAKIS A. N.; LECKIE J. O. **Modelling Leachate Generation and Transport in Solid Waste Landfills**: *Environ Technol*. 18(7):669-686. 1997.
- ELIAS, D. S. **Caracterização de cinzas de carvão mineral e sua aplicação como barreira impermeabilizante**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2018.
- EUROPEAN TECHNICAL COMMITTEE No. 8 (ETC 8). **Geotechnics of landfill design and remedial Works technical recommendations-GLR**. 2nd Ed., Ernst & Sohn (publ.). 1993.
- FARIAS, T. R. L.; MEDEIROS, P. H. A.; NAVARRO-HEVIA, J.; ARAUJO, J. C. **Unpaved rural roads as source areas of sediment in a watershed of the Brazilian semi-arid region**. *International Journal of Sediment Research* 34, p. 475–485, 2019.
- FREDLUND D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated Soil Mechanic in Engineering Practice**. John Wiley & Sons. Inc., 2012.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. **Stress State Variables for Unsaturated Soils**. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 103, no GT5, pp.447-466. 1977.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley & Sons, 1993.

FREDLUND, D. G.; VANAPALLI, S. K. **Shear Strenght of Unsaturated Soils**. Agronomy Soil Testing Manual, Agronomy Society of America, pp. 329-361. 2002.

FREDLUND, D. G.; XING, A. **Equations for the soil-water characteristic curve**. Canadian Geotechnical Journal, v. 32, n. 3, p. 521–532, 1994.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). **Índices de Aridez do Estado do Ceará**. Governo do Estado do Ceará. Disponível em: << http://www.funceme.br/?page_id=5826>>. Acesso em: 21 jul. 2021. Fortaleza, 2017.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). Banco de dados meteorológicos 2000-2019. Disponível por solicitação em <https://ceartransparente.ce.gov.br/sign_in?locale=pt-BR&ticket_type=sic>, Acesso em 15 jul 2020.

GARG, A.; LEUNG, A. K.; NG, C. W. W. **Comparisons of soil suction induced by evapotranspiration and transpiration of *S. heptaphylla***. Canadian Geotechnical Journal, 2015.

GEOSTUDIO. VADOSE/W. **Vadose Zone and Soil Cover Analysis**. User's Guide. 3rd Ed., 2007.

GEOSTUDIO. VADOSE/W. **Vadose Zone Modeling with VADOSE/W – An Engineering Methodology**. GEO-SLOPE International Ltd, 242 p. Canada, 2014.

GONÇALVES, C. G. **Avaliação por modelagem numérica de coberturas inibidoras de drenagem ácida de mina em pilhas de estéril e barragens de rejeito. Estudo de casos**. 165 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

GUIZELINI, A. P. **Estudo do comportamento hidromecânico de solos visando a construção de sistemas de cobertura alternativos para aterros**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations**. Academic Press, New York, 771 p, 1998.

HILLEL, D. **Introduction to environment soil and physical**. First Edition, 2003.

HUSE, K. **Estudo da Influência da Adição de Bentonita em um Solo Areno-Siltoso para Uso como Cobertura de Aterros**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

ISHIHARA, M. I.; HIURA, T. **Modeling leaf area index from litter collection and tree data in a deciduous broadleaf forest**. Agricultural and Forest Meteorology, v. 151, n. 7, p. 1016 – 1022, 2011.

JONCKHEEREA, I.; FLECKA, S.; NACKAERTSA, K.; MUYSA, B.; COPPINA, P.; WEISSB, M.; BARETC, F. **Review of methods for in situ leaf area index determination: Part i. theories, sensors and hemispherical photography**. Agricultural and Forest Meteorology, v. 121, p. 19 – 35, 2004.

KHIRE, M.; MEERDINK, J.; BENSON, C.; BOSSCHER, P. **Unsaturated hydraulic conductivity and water balance predictions for earthen landfill final covers**. In: W. Wray, W.; Houston, S. (eds.). Soil suction applications in geotechnical engineering practice (GSP no. 48), ASCE, pp. 38-57, 1995.

KHIRE, M.; BENSON, C.; BOSSCHER, P. **Field data from a capillary barrier and model predictions with UNSAT-H**. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 125(6), p. 518–527, 1999.

KHIRE, M.; BENSON, C. H.; BOSSCHER, P. J. **Water balance modeling of earthen final covers**. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 123(8), p. 744–754, 1997.

KOERNER, J. R.; KOERNER, R. M. **A survey of solid waste landfill liner and cover regulations Part II: Worldwide status**. GRI report 23, Geosynthetic Institute, Drexel University, USA. 1999.

KOERNER, R. M.; DANIEL, D. E. **Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps, 1 ed.** New York, ASCE PRESS, 1997.

LAKSHMIKANTA, M. R. **Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils**. Tese (Doutorado). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2009.

LAMBE, T. W.; WITHMAN, R. V. **Soil mechanics**. Ed. John Wiley & Sons, New York, USA, 1969.

LAWRENCE, D. M.; OLESON, K. W.; FLANNER, M. G.; THORTON, P. E.; SWENSON, S. C.; LAWRENCE, P. J.; ZENG, X.; YANG, Z.; LEVIS, S.; SAKAGUSHI, K.; BONAN, G.; SLATER, A.G. **Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the Community Land Model**. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, Vol. 3, Art M03001. 27pp, 2011.

LEE, H.C.; WRAY, W.K. **Techniques to evaluate soil suction – a vital unsaturated soil variable**. Proceedings of the first international conference on unsaturated soils. Paris, 1995.

LEUNG, A. K. **Grass evapotranspiration-induced suction in slope: case study**. Environmental Geotechnics. Issue EG3, pp. 155–165, 2016.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da Água no Solo**. Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP), 2ª edição, 352p. São Paulo, 2012.

MACHADO, S. L.; ZUQUETTE, L. V. **Transporte de massa e mecanismos de retenção em solos não saturados**. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. São Carlos, São Paulo, 2004.

MAGALHÃES, P. R. F. **Caracterização das Argilas para Utilização em Camadas de Impermeabilização em Sistemas de Cobertura de Aterros Sanitários no Semiárido**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2019.

MANASSERO, M.; BENSON, C. H.; BOUAZZA, A. **Solid Waste Containment Systems**. ISRM International Symposium, 19-24 November, Melbourne, Australia, 2000.

MANASSERO, M.; PASQUALINI, E.; SANI, D. **Potassium Sorption Isotherms of a Natural Clayey-Silt for Pollutant Containment**. Proc., 3rd ICEG, Lisbon, Balkema, Rotterdam. 1998.

MINE ENVIRONMENT NEUTRAL DRAINAGE PROGRAM (MEND). **Prevention and Control**. Manual 5.4.2d., Vol. 4. In: Tremblay GA, Hogan CM (eds) CANMET. 2001.

MONTEIRO, J. H. P.; FIGUEIREDO, C. E. M.; MAGALHÃES, A. F.; MELO, M. A. F.; BRITO, J. C. X.; ALMEIDA, T. P. F.; MANSUR, G. L. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM). Rio de Janeiro, 2001.

MONTEITH, J. L. **The development and extension of Penman's evaporation formula**. In: Hillel, D., "Applications of Soil Physics". Academic Press, New York, 1980.

MORALES, M. S. T. **Estudo numérico e experimental de problemas de fluxo saturado**. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2008.

MUALEM, Y. **A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media**. Water Resources Reserch: 12-3, 513-522. 1976.

NG, C. W. W.; CHEN, R.; COO, J. L.; LIU, J.; NI, J. J.; CHEN, Y. M.; ZHAN, L. T.; GUO, H. W.; LU, B.W. **A novel vegetated three-layer landfill cover system using recycled construction wastes without geomembrane**. Canadian Geotechnical Journal, 2019.

NG, C. W. W.; LEUNG, A. K.; WOON, K. X. **Effects of soil density on grass-induced suction distributions in compacted soil subjected to rainfall**. Canadian Geotechnical Journal, 51(3), 311–321. 2014.

NG, C. W. W.; NI, J. J.; LEUNG, A. K.; ZHOU, C.; WANG, Z. J. **Effects of planting density on tree growth and induced soil suction**. Géotechnique 66, No. 9, pp. 711–724, 2016.

NG, C. W. W.; WOON, K. X.; LEUNG, A. K.; CHU, L. M. **Experimental investigation of induced suction distribution in a grass-covered soil**. Ecological Engineering 52, pp. 219–223, 2013.

NI, J. J.; CHENG, Y.; WANG, Q.; NG, C. W. W.; GARG, A. **Effects of vegetation on soil temperature and water content: Field monitoring and numerical modelling.** Journal of Hydrology, Vol. 571, pp. 494-502, 2019.

NI, J. J.; LEUNG, A. K.; NG, C. W. W.; SO, P. S. **Investigation of plant growth and transpiration-induced matric suction under mixed grass-tree conditions.** Canadian Geotechnical Journal, 54(4), 2017.

NI, J. J.; NG, C. W. W. **Long-term effects of grass roots on gas permeability in unsaturated simulated landfill covers.** Science of The Total Environment, Vol. 666, 20 pp. 680-684, 2019.

NOBREGA, R. S. **Impactos do Desmatamento e de Mudanças Climáticas nos Recursos Hídricos na Amazônia Ocidental Utilizando o Modelo SLURP.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 29, n. esp., p. 111 - 120, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130024>

O'KANE M.; AYRES, B.; CHRISTENSEN, D.; MEIERS, G. **CANMET-CETEM Manual on Cover System Design for Reactive Mine Waste.** OKC Report No. 689 – 01, Junho, 2002.

OJIMA, M. K.; HAMADA, J. **Aterro Sanitário: Análise técnico-econômica para implantação e operação.** Simpósio Internacional de Destinação do Lixo. Conder, p. 214-247. Salvador, 1994.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12.** Nações Unidas Brasil. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12>>. Acesso em: 29 jun de 2021. Brasília, 2015.

PACHECO, J. R. **Estudo de certas potencialidades de processos oxidativos avançado para o tratamento de percolado de aterro sanitário.** Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

PENMAN, H.L. **Natural evaporation from open water, bare soil and grass.** Proceeding Royal Society, London, v.193, p.120-143. 1948.

POSSA, M. V.; BORGHETTI SOARES, A.; SOUZA, V. P.; SOARES MOREIRA, P. S. **Balanco Hídrico em Coberturas Secas Utilizando Modelagem Numérica.** Série Tecnologia Ambiental. Centro de Tecnologia Mineral. 43 p. Rio de Janeiro, 2015.

PRESA, E. P. **Indeformabilidad de Las Arcillas Expansivas Bajo Succion Controlada.** Tese (Doutorado). Universidade Politécnica de Madrid, 1982.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. **On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters.** Monthly Weather Review, v. 100, n. 2, p.81-92, 1972.

QDAIS, H. A.; ABDULLA, F.; QRENAWI, L. **Simulation of leachate production from an arid solid waste landfill using hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model.** Journal of Solid Waste Technology and Management, v. 34, no. 3, 2008.

REDDY, J. N. **An Introduction to the Finite Element Method** 3rd Ed. McGraw-Hill. ISBN 9780071267618, 2006.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** Barueri: Manole, 2004.

RIBEIRO, A. G. C. **Metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura com base em estudo de caso realizado na mina da empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) em Paracatu, Minas Gerais.** Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, 2011.

RIOS, D. C. **Aplicação de dois modelos de balanço hídrico para estudo de Camada de cobertura de aterro sanitário utilizando solo e resíduo da construção civil (RCC).** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, 2016.

RIOS, M. G. **Comportamento de um Aterro Compactado em Campo e Laboratório.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE). Rio de Janeiro, 2006.

ROBERTS, J. M.; CABRAL, O. M. R.; COSTA, J. P.; McWILLIAM, A. L. C.; SÁ, T. D. **An overview of the leaf area index and physiological measurements during ABRACOS.** In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. (Ed.). Amazonian deforestation and climate. Chichester: J. Wiley, 1996.

ROESLER, A. C.; BENSON, C. H.; ALBRIGH, T. W. H. **Field hydrology and model predictions for final covers in the alternative cover assessment program-2002.** Madison: University of Wisconsin-Madison. Geo Engineering Report No. 02-08. 2002.

SAJJAN, A. K; GYASI-AGYEI, Y.; SHARMA, R. H. **Rainfall–runoff modelling of railway embankment steep slopes.** Hydrological Sciences Journal, 58:5, pp. 1162-1176, 2013. doi: 10.1080/02626667.2013.802323.

SANTOS, G. O.; MATOS, M. V. B. **Cobertura Vegetal sobre Célula de Aterro Sanitário Encerrada há Vinte Anos no Ceará.** Conexões Ciência e Tecnologia, v. 11, n. 6, p. 54-64. DOI: 10.21439/conexoes.v11i6.891. Fortaleza, 2017.

SANTOS, O. G. **Resíduos sólidos e aterros sanitários: em busca de um novo olhar.** Editora Imprima. ISBN: 9788564778429. 2016.

SILVA, A. M. **Banco de Dados de Curvas de Retenção De Água.** Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 2005.

SILVA, G. L. A. **Comparação entre modelagem numérica e experimento de campo em escala real para sistema de cobertura na Mina Fazenda Brasileiro (Bahia)**. 90 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2014.

SIMÕES, G. F., LOBATO, L. C. da S.; MARTINS, H. L.; CATAPRETA, C. A. A. **Aplicação de um modelo tridimensional de avaliação de balanço hídrico em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos**. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, Campo Grande – MS. Anais... Campo Grande/MS, 2005.

SIMON, F. G., MULLER, W. W. **Standard and Alternative Landfill Capping Design in Germany**. Environmental Science & Policy, 7, pp.277-290, 2004.

SINNATHAMBY, G.; PHILLIPS, D. H.; SIVAKUMAR, V.; PAKSY, A. **Landfill cap models under simulated climate change precipitation: impacts of cracks and root growth**. Géotechnique, 64(2): 95–107, 2014.

SOBRINHO, N. L. C. **Uma análise do balanço hídrico do aterro sanitário de Presidente Prudente**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2000.

SOUZA, H. P. **Uso de cinzas de carvão mineral da termelétrica do pecém como material de cobertura seca de depósitos de resíduos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2018.

SOUZA, H. P.; SOARES, A. B.; ELIAS, D. S. **Ensaio de infiltração em modelos experimentais de coberturas secas utilizando cinzas de carvão mineral da Termelétrica do Pecém**. Materia-Rio de Janeiro, v. 24, p. e-12524, 2019.

SOUZA, V. P.; BORMA, L. D. S.; MENDONÇA, R. M. G. **Projeto de Coberturas Secas para Controle da Drenagem Ácida em Depósitos Geradores de Acidez**. Seminário Brasil-Canadá de Recuperação Ambiental de Áreas Mineradas. Florianópolis, 2003.

SUN, J.; YUEN, S. T. S.; FOURIE, A. B. **The effect of using a geotextile in a monolithic (evapotranspiration) alternative landfill cover on the resulting water balance**. Waste Management. Journal Homepage. v. 30, p. 2074-2083, 2010.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. **Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues**. IRWIN/McGRAWHILL, USA. 1993.

TEXEIRA, C. E.; TORVES, J. C.; FINOTTI, A. R.; FEDRIZZI, F.; MARINHO, F. A. M.; TEXEIRA, P. F. **Estudos sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil**. Eng Sanit Ambient. v.14 n.1. p. 99-108. 2009.

THORNTHWAITE, C.W. **An approach toward a rational classification of climate**. Geographical Review, New York, v.38, n.1, p.55-94, 1948.

TRATCH, D. **Moisture uptake within the root zone**. M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 1996.

TSUBOI, M.; IMAIZUMI, S.; MIYAJI, H. **Recent development of landfill liner design in Japa.** Proc. 1st ANZ Conf. on Environmental Geotechnics, pp. 239-244. Melbourne, Australia, 1997.

UBALDO, M. O. **Uso de cinzas de carvão na composição de uma cobertura de rejeitos de mineração.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro, 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers.** Office of solid waste and emergency response. EPA-540-R-04-007. Washington DC.: 421p, USEPA, 2002.

VAN GENUCHTEN, M. **A Closed Form Equation For Predicting The Hydraulic Conductivity Of Unsaturated Soils.** Soil Science. Am. Journal, v. 44, n. 5, pp.892-898, 1980.

VILAR, O. M. **Resistência ao Cisalhamento.** Escola de Engenharia de São Carlos. 2002.

WANG, Q.; ADIKU, S.; TENHUNEN, J.; GRANIER, A. **On the relationship of ndvi with leaf area index in a deciduous forest site.** Remote Sensing of Environment, v. 94, n. 2, p. 244 – 255, 2005.

WATSON, D. J. **Comparative physiological studies in the growth of field crops. i. variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years.** Annals of Botany, v. 11, p. 41 – 76, 1947.

WILSON, G. W. **Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems.** Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1990.

WILSON, G. W., FREDLUND, D. G.; BARBOUR, S. L. **The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces.** Canadian Geotechnical Journal, 34: 145-155. 1997.

WILSON, G. W.; FREDLUND, D.G.; BARBOUR, S.L. **Coupled soil – atmosphere modeling for soil evaporation.** Can. Geotech. J. 31, pp. 151 – 161. 1994.

XIAOLI, C.; XIN, Z.; ZIYANG, L.; SHIMAOKA, T.; NAKAYAMA, H.; XIANYAN, C.; YOUCAI, Z. **Characteristics of vegetation and its relationship with landfill gas in closed landfill.** Biomass and Bioenergy, 35(3), pp. 1295–1301, 2011.

YAN, H.; WANG, S.; BILLESBACH, D.; OECHEL, W.; ZHANG, J.; MEYERS, T.; MARTIN, T.; MATAMALA, R.; BALDOCCHI, D.; BOHRER, G.; DRAGONI, D.; SCOTT, R. **Global estimation of evapotranspiration using a leaf area index-based surface energy and water balance model.** Remote Sensing of Environment, v. 124, p. 581 – 595, 2012.

YANFUL, E.K. **Oxygen diffusion through soil covers on sulfidic mill tailings,** ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 119 (8):1207-28. 1993.

ZHANG, W.; SUN, C. **Parametric analyses of evapotranspiration landfill covers in humid region**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Journal Homepage. v. 6, p. 356-365, 2014

ZORNBERG, J. G., LAFOUNTAIN, L.; CALDWEL J. A. **Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 129, n. 6, pp. 427-438, 2003.

APÊNDICE A – CONDIÇÕES DE CONTORNO CLIMÁTICAS

Quadro 2.1 – Condições de contorno climáticas: precipitação média.

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2008 (MÉDIO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					4,39			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
1	30,600	23,900	77,750	77,750	4,500	7,700	0	24
2	30,800	24,600	76,000	76,000	3,600	1,100	0	24
3	31,100	22,500	81,500	81,500	2,400	12,000	0	24
4	30,600	23,700	79,000	79,000	2,800	34,700	0	24
5	30,900	24,700	71,250	71,250	4,000	0,000	0	24
6	31,200	23,900	72,750	72,750	2,500	0,000	0	24
7	31,800	25,700	78,750	78,750	3,500	0,000	0	24
8	30,800	24,400	78,250	78,250	3,000	0,100	0	24
9	30,900	23,900	74,250	74,250	3,800	0,500	0	24
10	31,200	23,600	75,250	75,250	3,600	0,000	0	24
11	30,100	24,200	82,750	82,750	2,300	1,200	0	24
12	31,300	24,500	76,750	76,750	3,500	6,000	0	24
13	28,800	23,900	82,750	82,750	3,400	8,000	0	24
14	29,400	23,600	87,500	87,500	2,300	57,600	0	24
15	30,200	23,900	78,250	78,250	3,000	21,700	0	24
16	29,500	24,600	86,750	86,750	1,600	4,400	0	24
17	29,800	23,900	86,000	86,000	2,800	7,600	0	24
18	30,300	23,800	82,750	82,750	2,100	36,200	0	24
19	30,300	23,900	85,250	85,250	1,900	11,400	0	24
20	31,000	24,200	83,500	83,500	2,100	0,200	0	24
21	30,900	25,100	80,500	80,500	1,300	0,200	0	24
22	30,500	25,100	82,250	82,250	1,500	3,200	0	24
23	28,900	22,500	93,750	93,750	1,100	3,800	0	24
24	30,400	22,600	85,500	85,500	2,100	48,000	0	24
25	31,500	23,900	79,750	79,750	2,800	0,000	0	24
26	31,200	24,800	78,500	78,500	2,700	0,400	0	24
27	31,500	24,900	75,500	75,500	3,800	0,000	0	24
28	31,700	25,400	78,500	78,500	2,800	0,000	0	24
29	31,100	25,500	79,500	79,500	3,700	3,400	0	24
30	31,800	25,000	78,500	78,500	2,900	3,600	0	24
31	30,000	24,700	79,000	79,000	2,900	5,400	0	24
32	30,900	23,600	80,000	80,000	2,300	1,600	0	24
33	31,700	23,300	76,750	76,750	2,500	0,000	0	24
34	31,500	24,000	74,500	74,500	2,800	0,000	0	24
35	31,400	24,600	73,250	73,250	3,500	0,000	0	24
36	31,900	24,100	76,750	76,750	3,100	0,000	0	24
37	31,800	24,400	76,250	76,250	2,200	0,000	0	24
38	31,800	24,000	77,500	77,500	3,600	0,000	0	24

Quadro 2.2 – Condições de contorno climáticas: precipitação média (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2008 (MÉDIO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					4,39			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
39	32,200	23,900	77,000	77,000	3,000	6,000	0	24
40	31,800	25,400	76,500	76,500	2,600	0,500	0	24
41	31,800	24,500	74,750	74,750	3,000	0,000	0	24
42	30,900	25,500	77,500	77,500	3,200	1,800	0	24
43	30,100	23,800	82,500	82,500	3,900	5,800	0	24
44	31,600	23,800	74,250	74,250	3,300	4,700	0	24
45	32,000	25,000	76,750	76,750	3,000	0,000	0	24
46	31,900	24,400	70,750	70,750	3,000	0,000	0	24
47	32,000	24,900	76,500	76,500	2,600	0,000	0	24
48	32,300	24,800	74,500	74,500	3,400	0,000	0	24
49	32,300	25,300	74,250	74,250	3,400	0,100	0	24
50	31,100	24,500	79,250	79,250	3,100	12,800	0	24
51	30,700	23,900	82,500	82,500	2,400	6,700	0	24
52	31,400	23,900	80,500	80,500	2,900	1,400	0	24
53	30,900	23,600	83,250	83,250	2,500	20,200	0	24
54	31,200	24,400	73,750	73,750	2,700	0,600	0	24
55	32,100	23,700	71,500	71,500	2,300	0,000	0	24
56	31,600	24,000	77,000	77,000	1,700	0,000	0	24
57	31,400	23,900	72,000	72,000	2,300	0,000	0	24
58	32,600	24,300	72,250	72,250	2,700	0,200	0	24
59	32,200	24,800	73,250	73,250	2,600	0,000	0	24
60	31,900	24,700	78,250	78,250	2,100	0,300	0	24
61	29,200	24,200	86,500	86,500	1,700	6,200	0	24
62	31,500	24,200	77,750	77,750	3,200	7,800	0	24
63	31,800	24,900	76,500	76,500	2,700	0,400	0	24
64	32,000	23,900	77,500	77,500	2,200	1,200	0	24
65	30,900	21,800	78,750	78,750	1,800	16,200	0	24
66	31,400	23,900	76,750	76,750	2,100	11,000	0	24
67	29,500	21,500	85,750	85,750	0,800	9,000	0	24
68	27,800	21,500	83,500	83,500	0,900	19,600	0	24
69	30,700	22,300	87,000	87,000	0,300	17,300	0	24
70	31,000	22,900	84,250	84,250	1,600	3,000	0	24
71	30,800	23,800	81,000	81,000	2,100	0,000	0	24
72	29,700	24,700	85,000	85,000	1,500	5,100	0	24
73	31,800	23,500	74,000	74,000	1,500	6,200	0	24
74	31,600	24,000	81,500	81,500	1,900	0,000	0	24
75	30,500	23,700	87,750	87,750	1,300	14,200	0	24
76	30,800	23,100	80,750	80,750	1,600	11,000	0	24

Quadro 2.3 – Condições de contorno climáticas: precipitação média (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2008 (MÉDIO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					4,39			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
77	30,500	23,000	79,250	79,250	2,000	6,200	0	24
78	29,900	23,200	81,750	81,750	1,300	0,000	0	24
79	31,500	22,900	78,500	78,500	1,200	7,200	0	24
80	31,900	23,500	85,000	85,000	2,500	3,000	0	24
81	29,800	21,900	83,500	83,500	1,000	67,800	0	24
82	31,300	23,000	85,000	85,000	1,100	0,000	0	24
83	28,900	23,900	87,250	87,250	1,700	11,000	0	24
84	29,400	23,900	89,250	89,250	1,000	32,600	0	24
85	30,300	23,400	85,250	85,250	1,200	0,000	0	24
86	30,500	23,800	85,250	85,250	2,100	7,200	0	24
87	31,400	23,000	83,000	83,000	2,200	0,000	0	24
88	28,800	23,700	93,500	93,500	0,500	7,000	0	24
89	30,700	22,800	83,250	83,250	2,100	1,000	0	24
90	29,100	22,900	88,500	88,500	1,200	45,200	0	24
91	29,700	23,400	93,750	93,750	1,500	0,000	0	24
92	29,500	23,000	90,000	90,000	1,600	4,000	0	24
93	30,700	23,100	90,750	90,750	1,400	0,700	0	24
94	30,900	22,900	86,000	86,000	1,500	5,600	0	24
95	30,800	23,900	83,500	83,500	2,400	0,000	0	24
96	30,700	23,900	92,500	92,500	1,100	3,600	0	24
97	30,400	23,200	88,000	88,000	1,200	37,400	0	24
98	29,800	23,900	90,500	90,500	1,600	8,900	0	24
99	26,700	23,400	94,750	94,750	0,800	14,900	0	24
100	31,600	22,500	85,750	85,750	2,000	26,500	0	24
101	30,800	23,700	81,750	81,750	2,800	0,000	0	24
102	30,900	23,500	90,750	90,750	1,800	9,800	0	24
103	28,500	22,700	91,000	91,000	1,400	37,600	0	24
104	28,800	22,500	84,250	84,250	1,200	2,600	0	24
105	28,300	23,100	88,000	88,000	1,600	0,000	0	24
106	30,600	22,700	87,000	87,000	1,900	30,000	0	24
107	30,700	23,400	84,250	84,250	1,600	7,900	0	24
108	30,400	22,900	82,750	82,750	2,500	21,400	0	24
109	28,900	24,300	93,250	93,250	1,500	1,200	0	24
110	31,400	23,500	81,250	81,250	2,000	1,600	0	24
111	31,200	23,700	81,000	81,000	2,600	4,400	0	24
112	28,900	23,400	91,750	91,750	1,400	9,200	0	24
113	30,800	23,500	87,500	87,500	1,700	12,900	0	24
114	29,300	23,000	91,250	91,250	1,700	33,200	0	24
115	31,100	23,700	84,500	84,500	2,200	71,000	0	24
116	30,700	23,500	83,750	83,750	2,300	0,000	0	24

Quadro 2.4 – Condições de contorno climáticas: precipitação média (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2008 (MÉDIO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					4,39			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
117	31,300	24,100	82,500	82,500	1,400	11,100	0	24
118	29,900	23,200	84,500	84,500	1,600	0,000	0	24
119	30,800	23,700	89,750	89,750	2,100	0,000	0	24
120	28,900	23,300	91,500	91,500	1,300	75,400	0	24
121	30,800	23,500	85,500	85,500	1,900	52,300	0	24
122	30,800	23,900	84,750	84,750	2,000	0,000	0	24
123	31,700	23,600	79,000	79,000	3,000	0,600	0	24
124	26,900	23,800	94,500	94,500	1,000	70,000	0	24
125	29,700	24,100	87,500	87,500	1,300	14,000	0	24
126	27,800	23,000	92,000	92,000	1,300	20,500	0	24
127	31,400	23,100	83,000	83,000	1,000	7,000	0	24
128	31,500	23,600	82,250	82,250	0,900	0,400	0	24
129	31,500	24,500	88,250	88,250	0,500	7,600	0	24
130	30,900	23,800	85,750	85,750	1,200	22,400	0	24
131	30,400	23,000	86,750	86,750	1,800	21,200	0	24
132	31,500	24,400	79,750	79,750	1,800	0,000	0	24
133	30,900	23,400	77,500	77,500	2,400	9,200	0	24
134	27,300	22,600	89,750	89,750	1,900	13,200	0	24
135	30,800	23,100	77,000	77,000	2,400	0,200	0	24
136	31,100	22,900	81,500	81,500	1,800	26,000	0	24
137	31,200	23,100	80,750	80,750	2,300	3,200	0	24
138	30,800	24,800	80,000	80,000	2,300	0,800	0	24
139	31,100	23,700	78,500	78,500	2,000	2,200	0	24
140	31,300	23,800	80,250	80,250	2,800	0,000	0	24
141	31,200	23,100	76,500	76,500	2,200	0,000	0	24
142	27,200	23,700	89,750	89,750	0,500	0,000	0	24
143	31,200	21,600	82,000	82,000	2,100	0,200	0	24
144	31,100	22,900	78,500	78,500	2,300	0,000	0	24
145	31,200	23,000	81,500	81,500	2,100	0,000	0	24
146	31,300	22,700	83,500	83,500	1,900	10,200	0	24
147	31,200	23,000	80,750	80,750	2,100	0,000	0	24
148	29,900	23,600	94,500	94,500	2,400	20,000	0	24
149	29,800	22,900	85,000	85,000	2,300	18,700	0	24
150	30,300	23,300	84,000	84,000	2,100	1,000	0	24
151	30,400	23,300	82,250	82,250	2,300	7,800	0	24
152	30,100	23,300	86,250	86,250	2,200	12,200	0	24
153	30,200	21,500	86,750	86,750	1,900	0,000	0	24
154	29,900	22,900	78,750	78,750	2,700	0,000	0	24
155	30,900	23,200	75,500	75,500	1,800	0,000	0	24
156	31,000	22,700	84,000	84,000	2,600	0,000	0	24

Quadro 2.5 – Condições de contorno climáticas: precipitação média (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2008 (MÉDIO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					4,39			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
157	30,200	22,800	85,750	85,750	1,500	6,300	0	24
158	30,200	22,800	82,500	82,500	2,400	40,600	0	24
159	30,800	22,500	81,000	81,000	2,700	0,000	0	24
160	28,300	22,400	89,000	89,000	3,000	0,600	0	24
161	30,000	21,600	83,750	83,750	3,000	44,200	0	24
162	30,400	22,800	81,750	81,750	2,600	0,000	0	24
163	29,900	23,700	81,000	81,000	2,400	0,000	0	24
164	30,000	24,000	81,750	81,750	1,900	0,000	0	24
165	30,900	23,700	80,500	80,500	2,500	0,000	0	24
166	30,200	23,100	82,000	82,000	2,200	0,000	0	24
167	29,600	22,800	81,500	81,500	2,500	1,400	0	24
168	30,100	23,900	86,750	86,750	3,100	0,000	0	24
169	29,900	23,200	81,250	81,250	3,500	1,600	0	24
170	30,300	23,500	84,750	84,750	1,300	0,000	0	24
171	30,300	22,800	80,000	80,000	2,300	0,000	0	24
172	30,800	22,400	81,000	81,000	2,600	0,000	0	24
173	29,700	22,400	72,750	72,750	2,500	0,000	0	24
174	30,300	20,200	76,750	76,750	2,400	0,000	0	24
175	30,700	23,100	81,750	81,750	2,600	0,000	0	24
176	30,900	23,300	85,000	85,000	2,500	0,000	0	24
177	31,300	23,100	78,750	78,750	3,300	0,000	0	24
178	30,900	22,300	78,750	78,750	1,900	0,000	0	24
179	29,800	22,600	76,750	76,750	2,300	0,000	0	24
180	28,100	23,500	81,000	81,000	2,400	0,000	0	24
181	30,600	22,600	81,250	81,250	2,800	0,000	0	24
182	31,700	21,500	73,000	73,000	2,100	0,000	0	24
183	30,500	22,900	82,000	82,000	3,100	2,300	0	24
184	30,700	22,900	77,250	77,250	2,500	2,700	0	24
185	31,400	22,900	73,250	73,250	2,700	0,000	0	24
186	31,000	23,300	78,250	78,250	3,400	0,000	0	24
187	31,200	23,000	79,000	79,000	2,100	0,000	0	24
188	29,900	22,900	80,500	80,500	3,900	0,000	0	24
189	30,400	21,700	74,500	74,500	2,100	0,000	0	24
190	31,400	21,200	74,500	74,500	3,200	0,000	0	24
191	29,900	21,500	70,000	70,000	3,500	0,000	0	24
192	31,400	22,300	74,750	74,750	2,600	0,000	0	24
193	32,200	22,400	76,500	76,500	2,800	0,000	0	24
194	31,700	23,500	69,250	69,250	4,000	0,000	0	24
195	31,900	21,700	67,750	67,750	2,600	0,000	0	24
196	31,200	22,500	69,250	69,250	2,500	0,000	0	24

Quadro 2.6 – Condições de contorno climáticas: precipitação média (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2008 (MÉDIO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					4,39			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
197	31,300	22,900	80,750	80,750	1,800	0,000	0	24
198	31,300	22,400	73,500	73,500	3,700	0,000	0	24
199	30,700	19,900	71,500	71,500	3,000	0,000	0	24
200	28,300	21,800	88,750	88,750	2,200	0,200	0	24
201	30,400	22,400	80,000	80,000	2,000	3,900	0	24
202	32,000	21,100	73,500	73,500	3,400	0,000	0	24
203	31,200	22,400	72,500	72,500	3,500	0,000	0	24
204	31,300	21,900	75,250	75,250	2,900	0,000	0	24
205	32,400	20,500	70,500	70,500	2,900	0,000	0	24
206	32,600	21,400	69,750	69,750	2,700	0,000	0	24
207	31,200	20,400	76,750	76,750	3,200	0,000	0	24
208	30,700	23,100	82,500	82,500	3,300	0,400	0	24
209	29,800	22,900	81,500	81,500	3,100	0,900	0	24
210	30,600	22,500	72,500	72,500	3,300	0,100	0	24
211	31,800	21,000	70,500	70,500	4,000	0,000	0	24
212	31,700	24,800	75,250	75,250	3,000	0,000	0	24
213	31,200	22,500	74,250	74,250	3,900	0,000	0	24
214	31,500	21,900	68,250	68,250	3,700	0,000	0	24
215	31,600	21,800	79,000	79,000	3,300	0,000	0	24
216	30,900	21,700	75,750	75,750	0,200	0,000	0	24
217	31,300	22,200	78,000	78,000	2,500	0,000	0	24
218	31,200	23,300	74,000	74,000	3,800	0,000	0	24
219	31,800	23,500	70,750	70,750	4,400	0,000	0	24
220	30,900	23,400	79,000	79,000	3,700	0,400	0	24
221	30,900	22,800	88,500	88,500	2,500	0,000	0	24
222	29,500	22,900	80,250	80,250	2,100	34,000	0	24
223	31,900	21,800	72,250	72,250	3,400	0,000	0	24
224	31,300	21,700	75,500	75,500	3,500	0,000	0	24
225	30,600	21,700	76,500	76,500	3,000	14,400	0	24
226	31,900	22,500	73,250	73,250	3,500	0,000	0	24
227	32,400	21,100	68,500	68,500	5,200	0,000	0	24
228	30,500	21,900	77,000	77,000	3,400	0,000	0	24
229	31,000	22,500	73,750	73,750	3,800	0,000	0	24
230	31,500	22,600	74,250	74,250	3,500	0,000	0	24
231	31,900	21,000	69,250	69,250	4,300	0,000	0	24
232	32,400	21,100	67,500	67,500	3,200	0,000	0	24
233	31,000	22,500	71,750	71,750	3,000	0,000	0	24
234	32,500	23,500	73,750	73,750	3,200	0,000	0	24
235	30,800	23,400	73,750	73,750	4,100	0,000	0	24
236	31,300	22,500	71,750	71,750	3,600	0,000	0	24

Quadro 2.7 – Condições de contorno climáticas: precipitação média (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2008 (MÉDIO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					4,39			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
237	31,700	22,500	73,000	73,000	3,800	0,000	0	24
238	33,400	22,400	67,500	67,500	2,700	0,000	0	24
239	31,500	22,600	73,250	73,250	4,200	0,000	0	24
240	29,900	23,000	80,000	80,000	4,000	6,100	0	24
241	31,900	22,400	77,250	77,250	3,200	0,000	0	24
242	30,900	23,100	74,250	74,250	4,500	0,000	0	24
243	30,800	23,500	77,000	77,000	3,800	0,000	0	24
244	30,900	23,600	76,750	76,750	4,700	0,000	0	24
245	30,400	22,800	71,500	71,500	3,300	0,000	0	24
246	30,900	22,700	68,500	68,500	4,300	0,000	0	24
247	31,200	22,800	72,750	72,750	3,900	0,000	0	24
248	31,900	22,600	66,750	66,750	4,400	0,000	0	24
249	31,200	22,300	69,250	69,250	3,700	0,000	0	24
250	31,400	23,300	70,500	70,500	3,700	0,000	0	24
251	32,100	23,800	77,000	77,000	3,300	0,000	0	24
252	31,400	22,500	72,250	72,250	4,900	0,000	0	24
253	32,400	23,300	65,750	65,750	4,200	0,000	0	24
254	33,000	22,900	71,250	71,250	3,600	0,000	0	24
255	32,100	24,400	72,500	72,500	4,000	0,000	0	24
256	31,800	22,900	68,000	68,000	4,300	0,000	0	24
257	32,300	23,300	72,500	72,500	4,000	0,000	0	24
258	31,300	22,700	70,250	70,250	3,300	0,000	0	24
259	32,100	22,700	65,250	65,250	4,300	0,000	0	24
260	32,300	22,300	66,000	66,000	4,600	0,000	0	24
261	32,600	22,800	68,250	68,250	3,700	0,000	0	24
262	32,800	24,100	68,250	68,250	5,000	0,000	0	24
263	31,800	25,100	71,250	71,250	3,400	0,000	0	24
264	31,300	23,900	71,750	71,750	4,000	0,000	0	24
265	33,200	23,400	64,500	64,500	3,800	0,000	0	24
266	30,800	23,600	70,000	70,000	3,300	0,000	0	24
267	30,400	22,300	75,250	75,250	4,400	0,000	0	24
268	31,200	23,400	72,250	72,250	3,600	0,000	0	24
269	31,800	23,800	73,250	73,250	3,600	0,000	0	24
270	32,900	23,600	67,750	67,750	3,600	0,000	0	24
271	31,300	22,400	70,750	70,750	3,500	0,000	0	24
272	31,800	22,700	70,750	70,750	3,300	0,000	0	24
273	31,900	24,900	77,250	77,250	3,300	0,000	0	24
274	31,800	24,300	71,500	71,500	4,800	0,000	0	24
275	31,900	25,000	66,250	66,250	3,500	0,000	0	24
276	29,400	23,600	87,000	87,000	0,600	0,800	0	24

Quadro 2.8 – Condições de contorno climáticas: precipitação média (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2008 (MÉDIO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					4,39			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
277	31,800	23,200	76,750	76,750	3,100	1,200	0	24
278	31,900	23,800	69,750	69,750	4,400	0,000	0	24
279	32,800	24,100	71,500	71,500	3,900	0,000	0	24
280	31,300	24,200	69,750	69,750	3,800	0,000	0	24
281	32,600	23,500	65,000	65,000	4,100	0,000	0	24
282	31,400	23,300	74,250	74,250	4,100	0,000	0	24
283	31,500	24,200	73,750	73,750	3,300	0,000	0	24
284	32,500	24,400	68,750	68,750	4,200	0,000	0	24
285	32,200	24,200	66,250	66,250	5,700	0,000	0	24
286	32,200	23,400	65,750	65,750	5,100	0,000	0	24
287	33,200	23,500	71,250	71,250	4,000	0,000	0	24
288	32,800	23,900	64,250	64,250	4,600	0,000	0	24
289	31,800	24,200	68,750	68,750	4,100	0,000	0	24
290	32,400	22,800	72,500	72,500	2,800	0,000	0	24
291	31,800	24,300	75,500	75,500	3,700	0,000	0	24
292	31,400	25,200	74,000	74,000	4,000	0,000	0	24
293	31,800	25,200	69,500	69,500	3,100	0,000	0	24
294	31,300	23,900	71,500	71,500	3,900	0,000	0	24
295	32,300	25,300	64,250	64,250	5,700	0,000	0	24
296	32,500	23,600	70,750	70,750	5,200	0,000	0	24
297	32,800	23,500	63,750	63,750	5,700	0,000	0	24
298	31,900	23,300	68,750	68,750	4,000	0,000	0	24
299	31,800	24,100	73,250	73,250	4,500	0,000	0	24
300	31,300	24,300	69,250	69,250	0,600	0,000	0	24
301	32,500	24,500	69,000	69,000	4,100	0,000	0	24
302	31,300	25,400	75,000	75,000	3,700	0,000	0	24
303	31,300	24,300	72,000	72,000	4,100	0,000	0	24
304	31,300	25,300	72,750	72,750	5,500	0,000	0	24
305	31,500	25,300	66,750	66,750	3,900	0,000	0	24
306	32,200	25,500	64,000	64,000	4,100	0,000	0	24
307	32,200	23,700	73,500	73,500	2,900	0,000	0	24
308	32,500	25,700	76,500	76,500	3,700	0,000	0	24
309	31,600	25,500	81,000	81,000	4,600	0,000	0	24
310	32,100	24,400	76,750	76,750	4,200	0,000	0	24
311	31,600	24,700	70,000	70,000	2,400	0,000	0	24
312	32,200	23,900	71,750	71,750	3,700	0,000	0	24
313	31,300	24,400	77,250	77,250	3,600	0,000	0	24
314	31,600	23,800	72,750	72,750	3,100	0,000	0	24
315	32,300	23,900	74,000	74,000	3,200	0,000	0	24
316	31,900	23,800	71,500	71,500	2,800	0,000	0	24

Quadro 2.9 – Condições de contorno climáticas: precipitação média (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2008 (MÉDIO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					4,39			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
317	31,500	25,600	72,750	72,750	3,100	0,000	0	24
318	31,800	25,300	71,500	71,500	4,800	0,000	0	24
319	30,900	24,300	78,250	78,250	3,600	0,600	0	24
320	31,700	24,600	70,750	70,750	3,500	2,300	0	24
321	31,400	25,300	71,250	71,250	3,700	0,000	0	24
322	32,000	23,600	71,500	71,500	3,500	0,000	0	24
323	31,900	25,600	71,750	71,750	3,600	0,000	0	24
324	31,700	25,500	71,750	71,750	4,000	0,000	0	24
325	31,700	25,300	72,000	72,000	4,000	0,000	0	24
326	32,200	23,700	69,750	69,750	3,300	0,000	0	24
327	31,800	25,500	74,500	74,500	4,300	0,000	0	24
328	32,100	25,500	71,000	71,000	4,000	0,000	0	24
329	32,100	25,500	70,000	70,000	3,700	0,000	0	24
330	32,300	25,300	74,250	74,250	4,300	0,000	0	24
331	32,000	25,500	71,250	71,250	4,100	0,000	0	24
332	31,900	25,900	69,250	69,250	4,200	0,000	0	24
333	31,400	23,500	72,750	72,750	3,500	0,000	0	24
334	32,200	25,300	71,250	71,250	3,900	0,000	0	24
335	31,300	26,000	75,250	75,250	3,500	0,000	0	24
336	31,800	25,500	75,250	75,250	3,000	0,000	0	24
337	31,800	25,500	72,750	72,750	2,900	0,000	0	24
338	31,900	25,400	71,000	71,000	2,600	0,000	0	24
339	32,000	23,800	72,500	72,500	2,300	0,000	0	24
340	32,600	23,900	74,000	74,000	4,200	0,000	0	24
341	31,500	24,800	75,500	75,500	3,000	0,000	0	24
342	32,200	25,700	70,250	70,250	3,500	0,000	0	24
343	31,900	23,300	75,750	75,750	3,300	4,400	0	24
344	31,300	24,500	70,500	70,500	3,200	0,000	0	24
345	31,800	25,400	71,500	71,500	3,000	0,000	0	24
346	31,800	24,600	71,250	71,250	5,000	0,000	0	24
347	31,900	25,900	71,000	71,000	4,100	0,000	0	24
348	32,100	24,700	72,500	72,500	3,300	0,000	0	24
349	32,300	25,200	72,750	72,750	3,700	0,000	0	24
350	31,800	23,900	69,750	69,750	3,500	0,000	0	24
351	32,100	24,100	72,250	72,250	2,500	0,000	0	24
352	32,200	24,200	74,500	74,500	4,800	0,000	0	24
353	32,100	26,300	72,750	72,750	3,100	0,000	0	24
354	31,900	24,900	72,500	72,500	3,700	0,000	0	24
355	31,100	26,400	80,250	80,250	4,000	0,000	0	24
356	30,800	25,600	76,250	76,250	3,300	0,800	0	24

Quadro 2.10 – Condições de contorno climáticas: precipitação média (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2008 (MÉDIO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					4,39			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
357	31,800	26,100	70,500	70,500	3,900	0,000	0	24
358	32,200	23,300	69,250	69,250	3,200	0,000	0	24
359	32,100	24,500	70,500	70,500	2,700	0,000	0	24
360	31,900	24,500	72,750	72,750	3,400	0,000	0	24
361	32,800	25,000	73,250	73,250	3,300	0,000	0	24
362	33,000	24,100	74,750	74,750	3,200	0,000	0	24
363	31,900	25,500	79,750	79,750	4,100	2,800	0	24
364	32,000	25,300	73,250	73,250	3,900	0,000	0	24
365	31,600	25,600	74,750	74,750	3,600	0,000	0	24

Fonte: FUNCEME (2020).

Quadro 3.1 – Condições de contorno climáticas: precipitação máxima.

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2009 (MÁXIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					6,46			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
1	32,000	26,100	72,750	72,750	3,600	0,000	0	24
2	32,000	25,900	72,250	72,250	2,000	0,000	0	24
3	31,900	24,300	71,500	71,500	2,500	0,000	0	24
4	31,900	20,700	71,500	71,500	3,600	0,000	0	24
5	32,800	24,400	72,250	72,250	3,300	0,000	0	24
6	32,400	24,900	71,500	71,500	4,700	0,000	0	24
7	31,900	25,200	70,500	70,500	2,800	0,000	0	24
8	31,800	24,700	72,500	72,500	3,500	0,000	0	24
9	32,200	24,300	72,250	72,250	3,100	0,100	0	24
10	30,800	24,900	73,500	73,500	3,900	0,000	0	24
11	31,600	24,100	75,250	75,250	4,000	3,900	0	24
12	31,600	24,500	70,750	70,750	4,000	0,000	0	24
13	32,800	24,600	76,250	76,250	2,500	0,000	0	24
14	30,300	23,900	81,000	81,000	3,000	7,400	0	24
15	31,700	24,000	70,500	70,500	2,600	4,200	0	24
16	30,500	24,300	82,750	82,750	2,600	8,700	0	24
17	31,900	24,200	80,000	80,000	3,800	2,400	0	24
18	32,400	25,300	79,500	79,500	3,200	2,200	0	24
19	29,400	24,600	83,250	83,250	2,500	11,400	0	24
20	31,100	22,900	79,750	79,750	2,100	5,000	0	24
21	28,100	22,300	92,000	92,000	0,800	22,200	0	24
22	31,100	22,300	82,000	82,000	1,800	50,200	0	24
23	30,900	24,300	78,750	78,750	1,100	0,000	0	24
24	31,000	24,400	81,500	81,500	1,700	1,800	0	24
25	30,400	23,800	83,750	83,750	1,900	18,300	0	24
26	31,100	23,300	74,750	74,750	3,500	0,000	0	24
27	31,400	23,900	74,750	74,750	3,000	0,200	0	24
28	31,400	24,100	78,000	78,000	2,300	0,000	0	24
29	28,400	24,100	92,500	92,500	1,700	9,800	0	24
30	30,600	24,300	84,000	84,000	1,700	9,100	0	24
31	30,900	24,100	84,250	84,250	1,500	5,100	0	24
32	28,100	23,700	90,500	90,500	2,300	11,100	0	24
33	29,100	23,800	83,500	83,500	1,800	14,500	0	24
34	30,800	23,700	86,250	86,250	2,300	22,400	0	24
35	30,100	23,700	85,750	85,750	2,100	12,800	0	24
36	31,000	23,600	76,000	76,000	2,900	0,000	0	24
37	31,100	25,600	75,500	75,500	3,300	0,000	0	24
38	31,400	25,700	71,750	71,750	3,300	0,000	0	24

Quadro 3.2 – Condições de contorno climáticas: precipitação máxima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2009 (MÁXIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					6,46			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
39	31,700	23,700	74,750	74,750	2,900	1,600	0	24
40	31,600	23,700	75,000	75,000	3,900	0,000	0	24
41	31,300	24,100	79,000	79,000	3,300	5,100	0	24
42	31,900	24,500	78,250	78,250	2,400	0,000	0	24
43	31,900	24,700	76,000	76,000	2,500	0,000	0	24
44	31,200	26,400	78,250	78,250	3,300	0,200	0	24
45	30,800	24,300	87,000	87,000	2,600	0,800	0	24
46	30,900	24,700	79,500	79,500	3,200	25,200	0	24
47	31,100	24,100	80,000	80,000	2,300	0,400	0	24
48	31,100	24,700	77,750	77,750	2,400	0,000	0	24
49	30,000	24,800	80,250	80,250	1,700	4,200	0	24
50	31,500	23,700	80,000	80,000	2,100	5,600	0	24
51	30,800	23,900	82,500	82,500	2,100	7,400	0	24
52	28,500	23,500	87,250	87,250	1,100	7,800	0	24
53	28,400	23,400	91,750	91,750	1,700	27,600	0	24
54	25,000	21,600	96,000	96,000	0,800	48,200	0	24
55	31,100	21,900	81,250	81,250	2,900	36,200	0	24
56	29,900	23,800	84,750	84,750	1,500	10,600	0	24
57	29,800	22,800	88,000	88,000	1,400	19,400	0	24
58	26,500	22,900	94,000	94,000	0,900	28,100	0	24
59	30,600	23,100	85,000	85,000	1,300	17,800	0	24
60	27,400	23,600	92,250	92,250	1,000	5,400	0	24
61	30,500	23,400	84,250	84,250	1,500	6,800	0	24
62	28,100	23,700	89,750	89,750	1,500	32,000	0	24
63	29,000	23,600	89,500	89,500	2,200	6,400	0	24
64	27,800	22,900	91,500	91,500	0,700	31,900	0	24
65	30,700	23,500	84,250	84,250	1,400	9,600	0	24
66	28,400	24,000	90,750	90,750	1,600	0,000	0	24
67	29,900	23,700	85,000	85,000	1,300	12,400	0	24
68	29,900	23,500	81,750	81,750	2,900	1,200	0	24
69	31,500	24,300	77,750	77,750	3,300	0,000	0	24
70	27,900	22,900	90,500	90,500	0,800	67,000	0	24
71	30,000	23,100	87,500	87,500	1,400	45,200	0	24
72	31,300	23,800	87,250	87,250	1,800	1,400	0	24
73	31,100	24,500	87,750	87,750	0,800	0,400	0	24
74	29,900	23,500	85,000	85,000	1,100	0,400	0	24
75	29,100	23,500	87,250	87,250	1,600	6,900	0	24
76	28,900	22,700	86,750	86,750	1,200	45,800	0	24

Quadro 3.3 – Condições de contorno climáticas: precipitação máxima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2009 (MÁXIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					6,46			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
77	30,400	23,200	80,750	80,750	2,100	1,800	0	24
78	30,300	23,300	83,250	83,250	1,700	0,000	0	24
79	31,500	23,700	77,750	77,750	2,300	0,000	0	24
80	31,300	24,000	78,000	78,000	2,700	0,000	0	24
81	29,300	24,300	93,250	93,250	0,900	19,000	0	24
82	29,600	24,100	89,000	89,000	2,000	21,700	0	24
83	29,700	23,800	87,250	87,250	2,400	15,600	0	24
84	30,400	23,900	87,000	87,000	1,400	4,300	0	24
85	28,800	23,900	89,750	89,750	1,400	7,300	0	24
86	30,000	23,900	88,250	88,250	0,900	7,600	0	24
87	28,000	23,000	88,750	88,750	0,900	34,800	0	24
88	31,600	22,900	87,500	87,500	0,800	44,200	0	24
89	31,100	24,000	91,000	91,000	0,700	0,600	0	24
90	30,800	23,300	84,750	84,750	1,400	49,800	0	24
91	31,300	23,900	81,500	81,500	1,800	31,100	0	24
92	31,300	23,500	81,250	81,250	1,300	0,600	0	24
93	30,900	23,800	84,500	84,500	1,000	5,600	0	24
94	30,400	22,600	88,750	88,750	0,900	52,400	0	24
95	30,700	23,500	79,000	79,000	1,200	0,000	0	24
96	30,500	23,500	83,250	83,250	1,500	0,000	0	24
97	31,300	23,400	77,750	77,750	1,900	1,200	0	24
98	31,700	24,300	88,250	88,250	0,900	0,400	0	24
99	28,600	23,300	94,500	94,500	1,500	32,600	0	24
100	29,900	23,800	87,750	87,750	2,400	5,400	0	24
101	31,100	23,500	85,250	85,250	1,200	0,000	0	24
102	30,500	23,300	86,250	86,250	1,600	0,800	0	24
103	27,700	23,100	93,500	93,500	0,300	43,900	0	24
104	31,000	22,500	84,000	84,000	2,100	16,000	0	24
105	27,800	23,000	91,000	91,000	1,300	12,600	0	24
106	28,300	23,400	94,250	94,250	0,700	9,400	0	24
107	29,700	22,700	91,250	91,250	2,200	65,000	0	24
108	29,800	23,800	87,500	87,500	1,900	2,400	0	24
109	31,300	24,200	80,500	80,500	2,100	0,000	0	24
110	28,400	22,600	91,250	91,250	1,900	38,700	0	24
111	30,700	23,600	90,750	90,750	1,400	2,600	0	24
112	31,300	22,900	86,750	86,750	0,200	69,400	0	24
113	29,600	23,800	87,500	87,500	1,500	0,000	0	24
114	28,900	23,600	87,750	87,750	1,800	0,400	0	24
115	27,500	23,100	92,500	92,500	0,400	16,000	0	24
116	31,000	22,900	82,250	82,250	0,900	1,200	0	24

Quadro 3.4 – Condições de contorno climáticas: precipitação máxima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2009 (MÁXIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					6,46			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
117	28,300	22,700	92,500	92,500	1,000	0,000	0	24
118	30,800	22,500	84,000	84,000	1,000	62,100	0	24
119	32,200	23,300	86,500	86,500	1,500	0,000	0	24
120	27,900	23,100	93,000	93,000	0,700	91,200	0	24
121	31,700	23,300	84,500	84,500	1,900	2,900	0	24
122	27,700	23,100	93,750	93,750	2,600	10,600	0	24
123	26,000	21,800	95,000	95,000	0,500	35,100	0	24
124	31,900	22,300	85,750	85,750	2,500	2,200	0	24
125	30,300	23,900	87,250	87,250	2,200	12,600	0	24
126	30,100	23,600	87,750	87,750	1,200	0,200	0	24
127	30,900	23,200	83,500	83,500	1,100	11,600	0	24
128	28,700	23,500	95,000	95,000	0,300	5,000	0	24
129	30,900	22,600	84,500	84,500	1,300	7,800	0	24
130	31,900	23,100	85,250	85,250	0,900	0,000	0	24
131	28,500	22,900	92,000	92,000	1,400	23,000	0	24
132	30,900	23,300	82,250	82,250	1,200	1,400	0	24
133	30,400	23,600	88,500	88,500	0,600	0,000	0	24
134	30,700	23,100	85,500	85,500	2,000	1,800	0	24
135	31,500	23,600	87,000	87,000	1,800	1,400	0	24
136	31,500	23,400	84,000	84,000	0,900	0,000	0	24
137	31,300	23,700	87,750	87,750	1,600	0,000	0	24
138	27,800	23,700	94,250	94,250	0,900	10,400	0	24
139	28,900	23,400	88,250	88,250	1,200	5,200	0	24
140	31,800	22,900	85,250	85,250	1,600	0,000	0	24
141	27,900	22,400	96,750	96,750	1,200	73,800	0	24
142	29,300	23,200	90,500	90,500	1,900	1,300	0	24
143	26,300	23,400	97,000	97,000	1,100	17,400	0	24
144	30,300	23,400	86,750	86,750	1,500	12,800	0	24
145	26,900	24,400	93,000	93,000	1,000	38,400	0	24
146	27,700	23,000	92,000	92,000	0,200	23,200	0	24
147	28,400	23,000	92,250	92,250	1,100	2,200	0	24
148	30,500	23,300	87,250	87,250	1,600	1,100	0	24
149	30,900	23,300	83,250	83,250	2,100	3,200	0	24
150	30,700	23,300	84,750	84,750	2,300	0,000	0	24
151	31,100	23,500	85,750	85,750	1,500	1,200	0	24
152	31,300	23,300	82,750	82,750	1,500	0,000	0	24
153	26,900	23,700	95,750	95,750	1,800	0,000	0	24
154	30,700	23,100	88,000	88,000	1,500	8,700	0	24
155	30,700	23,100	84,500	84,500	3,700	31,800	0	24
156	30,500	23,500	87,250	87,250	3,400	0,000	0	24

Quadro 3.5 – Condições de contorno climáticas: precipitação máxima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2009 (MÁXIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					6,46			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
157	30,900	23,400	86,250	86,250	2,600	0,000	0	24
158	30,900	23,300	78,750	78,750	2,800	0,000	0	24
159	30,800	22,800	83,250	83,250	2,500	0,000	0	24
160	30,700	23,000	87,500	87,500	2,700	0,000	0	24
161	30,100	23,000	89,000	89,000	2,400	14,700	0	24
162	28,500	23,100	89,000	89,000	1,400	0,400	0	24
163	31,200	23,100	83,000	83,000	1,600	0,000	0	24
164	31,700	22,900	83,500	83,500	2,000	0,000	0	24
165	29,700	23,800	86,000	86,000	3,600	0,000	0	24
166	30,000	22,600	77,500	77,500	2,400	11,400	0	24
167	30,800	23,300	77,250	77,250	2,100	0,000	0	24
168	30,500	23,500	81,250	81,250	1,700	1,200	0	24
169	30,300	22,400	81,250	81,250	2,000	0,000	0	24
170	30,000	22,700	82,000	82,000	3,800	23,400	0	24
171	30,100	22,600	80,250	80,250	2,400	3,200	0	24
172	30,500	23,400	76,250	76,250	2,600	0,000	0	24
173	30,500	22,900	85,000	85,000	2,700	0,000	0	24
174	26,500	21,700	93,500	93,500	1,100	72,600	0	24
175	28,500	22,400	90,500	90,500	2,200	13,000	0	24
176	29,500	22,500	89,750	89,750	0,900	71,000	0	24
177	30,200	21,900	84,500	84,500	2,900	0,000	0	24
178	30,800	23,000	83,500	83,500	2,400	0,000	0	24
179	29,300	23,300	80,750	80,750	2,000	0,000	0	24
180	30,500	22,800	78,750	78,750	3,400	1,200	0	24
181	30,700	23,700	76,250	76,250	2,100	0,000	0	24
182	30,400	21,800	80,250	80,250	2,300	0,000	0	24
183	30,100	23,000	81,750	81,750	2,100	1,200	0	24
184	31,100	23,000	78,500	78,500	3,200	0,000	0	24
185	30,600	22,600	75,250	75,250	3,400	1,600	0	24
186	31,300	21,700	80,750	80,750	3,100	1,200	0	24
187	28,600	22,200	89,750	89,750	2,400	46,600	0	24
188	28,100	22,400	87,750	87,750	2,000	12,600	0	24
189	29,400	21,600	77,750	77,750	2,500	7,200	0	24
190	30,400	21,700	79,000	79,000	3,300	0,000	0	24
191	29,500	21,700	80,750	80,750	3,100	0,000	0	24
192	30,400	21,900	81,000	81,000	3,800	7,500	0	24
193	29,900	22,300	84,000	84,000	1,400	9,200	0	24
194	30,300	22,700	80,250	80,250	4,200	1,200	0	24
195	31,500	23,600	76,000	76,000	3,100	0,000	0	24
196	30,500	23,300	77,000	77,000	3,500	0,000	0	24

Quadro 3.6 – Condições de contorno climáticas: precipitação máxima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2009 (MÁXIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					6,46			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
197	30,300	22,800	81,750	81,750	2,700	0,000	0	24
198	29,200	22,600	84,750	84,750	2,600	7,200	0	24
199	29,600	22,900	81,750	81,750	2,400	21,600	0	24
200	30,400	23,200	83,750	83,750	1,300	3,700	0	24
201	30,000	22,500	83,500	83,500	1,400	0,000	0	24
202	29,900	23,400	80,250	80,250	2,800	0,800	0	24
203	30,000	22,600	86,750	86,750	1,900	39,400	0	24
204	26,400	22,800	92,250	92,250	1,600	28,000	0	24
205	30,500	21,400	84,500	84,500	2,300	19,400	0	24
206	30,400	21,900	79,750	79,750	3,700	0,000	0	24
207	31,700	22,300	78,750	78,750	2,000	0,000	0	24
208	30,400	22,500	78,250	78,250	2,300	0,000	0	24
209	31,000	22,600	78,500	78,500	2,000	0,000	0	24
210	30,400	21,900	78,500	78,500	2,500	0,000	0	24
211	30,800	22,800	77,000	77,000	3,200	0,400	0	24
212	31,100	22,300	72,250	72,250	3,300	0,000	0	24
213	30,500	22,400	77,000	77,000	2,700	0,000	0	24
214	30,900	22,100	74,750	74,750	2,800	0,000	0	24
215	31,800	22,500	72,000	72,000	3,900	0,000	0	24
216	30,900	20,900	72,250	72,250	3,600	0,000	0	24
217	30,600	23,500	74,000	74,000	3,500	0,000	0	24
218	30,700	23,100	79,500	79,500	3,000	0,600	0	24
219	31,100	23,000	74,250	74,250	5,600	0,000	0	24
220	31,300	22,300	70,500	70,500	3,300	0,000	0	24
221	31,400	22,400	68,000	68,000	3,400	0,000	0	24
222	31,500	22,400	76,000	76,000	2,300	0,000	0	24
223	30,700	22,800	76,250	76,250	3,600	0,000	0	24
224	31,700	22,700	80,750	80,750	3,200	0,000	0	24
225	32,900	22,300	70,750	70,750	3,300	0,000	0	24
226	30,800	23,000	75,500	75,500	3,100	0,000	0	24
227	30,500	22,100	73,250	73,250	4,000	0,000	0	24
228	31,300	21,100	73,500	73,500	3,500	0,000	0	24
229	30,800	20,400	71,500	71,500	4,100	0,000	0	24
230	31,400	22,300	78,000	78,000	3,000	0,000	0	24
231	30,600	22,300	80,250	80,250	2,900	0,000	0	24
232	30,800	22,300	81,250	81,250	3,400	0,000	0	24
233	30,400	23,300	80,750	80,750	3,900	8,500	0	24
234	30,100	24,500	80,500	80,500	4,700	0,000	0	24
235	29,800	23,100	77,000	77,000	4,200	15,900	0	24
236	28,600	23,300	90,250	90,250	2,900	7,700	0	24

Quadro 3.7 – Condições de contorno climáticas: precipitação máxima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2009 (MÁXIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					6,46			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
237	30,400	22,900	79,250	79,250	3,300	1,000	0	24
238	26,000	21,900	91,000	91,000	2,500	2,200	0	24
239	30,900	22,200	80,000	80,000	2,500	5,200	0	24
240	30,500	22,900	79,000	79,000	3,000	0,200	0	24
241	31,200	23,500	77,250	77,250	3,900	0,000	0	24
242	31,800	23,400	72,000	72,000	4,400	0,000	0	24
243	31,500	21,500	69,500	69,500	3,400	0,000	0	24
244	32,200	22,200	70,250	70,250	3,600	0,000	0	24
245	31,000	22,900	70,750	70,750	3,800	0,000	0	24
246	31,900	24,300	75,250	75,250	3,600	0,000	0	24
247	31,000	22,300	74,750	74,750	4,200	0,000	0	24
248	31,000	23,200	76,000	76,000	3,800	0,000	0	24
249	30,800	23,300	72,750	72,750	4,200	0,000	0	24
250	30,800	22,800	73,250	73,250	3,900	0,000	0	24
251	31,000	23,600	73,750	73,750	3,800	0,000	0	24
252	30,800	23,300	72,750	72,750	3,900	0,000	0	24
253	31,000	23,200	70,000	70,000	3,600	0,000	0	24
254	32,000	21,600	69,750	69,750	4,300	0,000	0	24
255	31,100	23,900	75,750	75,750	4,100	0,000	0	24
256	31,400	23,600	72,000	72,000	3,700	0,000	0	24
257	31,100	23,300	77,250	77,250	3,700	0,900	0	24
258	31,300	23,300	76,000	76,000	3,700	0,000	0	24
259	30,600	24,000	76,500	76,500	3,800	1,800	0	24
260	31,400	24,300	68,500	68,500	4,400	0,100	0	24
261	29,900	24,900	75,000	75,000	4,200	0,000	0	24
262	31,000	23,800	76,500	76,500	3,900	0,000	0	24
263	31,100	24,600	70,000	70,000	2,800	0,000	0	24
264	31,400	22,500	73,000	73,000	3,500	0,000	0	24
265	31,400	24,700	74,000	74,000	4,100	0,000	0	24
266	31,600	23,800	72,000	72,000	4,500	0,600	0	24
267	31,000	25,100	72,250	72,250	4,300	0,000	0	24
268	31,000	24,600	73,250	73,250	3,000	0,000	0	24
269	31,400	24,400	74,000	74,000	4,100	0,000	0	24
270	32,000	23,100	68,500	68,500	3,100	0,000	0	24
271	32,600	22,600	68,500	68,500	4,200	0,000	0	24
272	32,400	23,800	70,500	70,500	4,200	0,000	0	24
273	31,600	22,700	68,000	68,000	3,100	0,000	0	24
274	31,400	22,400	69,750	69,750	3,500	0,000	0	24
275	30,900	23,900	68,750	68,750	3,600	1,100	0	24
276	30,800	23,500	70,750	70,750	4,300	0,000	0	24

Quadro 3.8 – Condições de contorno climáticas: precipitação máxima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2009 (MÁXIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					6,46			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
277	30,700	23,700	72,750	72,750	3,300	0,000	0	24
278	31,300	23,200	74,500	74,500	3,400	0,000	0	24
279	31,400	22,700	73,750	73,750	2,800	0,000	0	24
280	31,500	23,800	72,250	72,250	3,700	0,000	0	24
281	31,400	23,400	68,750	68,750	3,000	0,000	0	24
282	31,000	22,300	70,000	70,000	3,700	0,000	0	24
283	30,600	23,700	71,250	71,250	2,700	0,000	0	24
284	31,000	24,100	71,500	71,500	3,100	0,000	0	24
285	31,400	23,700	73,500	73,500	3,200	0,000	0	24
286	31,600	22,500	67,750	67,750	3,700	0,000	0	24
287	31,100	23,200	69,750	69,750	4,600	0,000	0	24
288	31,900	24,300	75,750	75,750	4,200	1,300	0	24
289	32,000	23,700	67,750	67,750	5,400	0,000	0	24
290	31,600	24,200	71,500	71,500	3,300	0,000	0	24
291	31,400	24,300	70,750	70,750	3,700	2,200	0	24
292	31,000	24,700	68,500	68,500	3,700	0,000	0	24
293	31,300	24,900	70,500	70,500	2,900	0,000	0	24
294	31,000	22,500	68,500	68,500	3,500	0,000	0	24
295	31,100	24,300	69,500	69,500	4,100	0,000	0	24
296	31,600	24,200	71,750	71,750	3,100	0,000	0	24
297	31,600	22,500	74,250	74,250	2,900	0,000	0	24
298	32,200	23,100	75,500	75,500	3,400	0,000	0	24
299	31,600	25,200	69,750	69,750	3,400	0,000	0	24
300	31,400	24,300	71,750	71,750	3,700	0,600	0	24
301	30,200	24,700	78,000	78,000	4,000	1,800	0	24
302	31,400	25,300	70,750	70,750	3,800	0,000	0	24
303	31,300	22,900	68,750	68,750	3,400	0,500	0	24
304	31,800	22,300	71,750	71,750	4,100	0,000	0	24
305	31,400	25,400	70,500	70,500	3,900	0,000	0	24
306	31,400	23,300	69,750	69,750	4,300	0,000	0	24
307	31,500	25,000	74,250	74,250	3,000	0,000	0	24
308	32,000	25,100	74,000	74,000	4,000	0,000	0	24
309	32,200	24,500	69,750	69,750	3,700	0,200	0	24
310	31,900	25,200	70,250	70,250	4,100	0,000	0	24
311	32,100	24,400	58,000	58,000	4,200	0,000	0	24
312	32,300	25,000	74,000	74,000	3,100	0,000	0	24
313	31,700	25,500	74,000	74,000	3,800	0,000	0	24
314	31,800	23,900	73,500	73,500	4,100	0,000	0	24
315	31,400	24,600	71,250	71,250	2,300	0,000	0	24
316	30,600	24,600	70,000	70,000	4,300	0,000	0	24

Quadro 3.9 – Condições de contorno climáticas: precipitação máxima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2009 (MÁXIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					6,46			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
317	30,800	24,100	75,000	75,000	3,700	0,800	0	24
318	31,400	24,400	70,750	70,750	3,800	0,000	0	24
319	31,900	23,300	70,000	70,000	4,100	0,000	0	24
320	31,600	25,400	73,500	73,500	3,100	0,000	0	24
321	31,900	24,100	74,500	74,500	3,400	0,000	0	24
322	31,000	23,800	75,000	75,000	3,500	2,400	0	24
323	30,200	24,500	75,250	75,250	4,900	2,400	0	24
324	31,600	24,100	65,500	65,500	6,500	0,000	0	24
325	31,200	23,100	67,000	67,000	5,000	0,000	0	24
326	31,600	24,200	69,750	69,750	3,600	0,600	0	24
327	31,400	23,800	70,500	70,500	3,200	0,000	0	24
328	31,400	24,800	69,250	69,250	3,000	0,000	0	24
329	31,600	25,200	70,750	70,750	4,100	0,000	0	24
330	31,800	23,500	71,250	71,250	4,100	0,000	0	24
331	32,200	24,800	72,500	72,500	4,300	0,600	0	24
332	32,000	25,100	71,250	71,250	4,200	0,000	0	24
333	32,200	25,900	71,750	71,750	4,600	0,000	0	24
334	31,800	25,400	74,250	74,250	4,200	0,000	0	24
335	31,200	25,300	77,000	77,000	3,900	3,800	0	24
336	31,000	25,100	76,750	76,750	4,200	0,000	0	24
337	31,600	24,900	72,750	72,750	4,300	0,000	0	24
338	31,600	25,100	73,750	73,750	3,400	0,000	0	24
339	31,400	24,900	77,000	77,000	4,200	1,500	0	24
340	31,700	25,500	75,250	75,250	3,800	0,000	0	24
341	32,300	25,700	76,500	76,500	4,200	0,000	0	24
342	32,400	25,700	71,250	71,250	4,000	0,000	0	24
343	31,800	23,300	71,500	71,500	4,000	0,000	0	24
344	32,400	24,600	72,500	72,500	3,700	0,000	0	24
345	31,600	24,300	75,250	75,250	3,500	0,000	0	24
346	30,800	25,000	80,250	80,250	2,300	1,900	0	24
347	31,300	23,100	80,250	80,250	1,900	0,000	0	24
348	31,700	24,100	74,250	74,250	3,600	0,000	0	24
349	30,900	24,300	78,750	78,750	3,100	3,900	0	24
350	31,800	24,300	75,250	75,250	3,400	1,200	0	24
351	32,000	25,300	75,750	75,750	3,200	1,000	0	24
352	30,500	23,700	80,750	80,750	3,600	8,600	0	24
353	32,000	25,300	75,000	75,000	4,500	0,700	0	24
354	32,200	25,600	73,500	73,500	3,500	0,000	0	24
355	31,400	24,700	78,250	78,250	3,200	0,000	0	24
356	31,400	24,400	78,000	78,000	2,200	0,000	0	24

Quadro 3.10 – Condições de contorno climáticas: precipitação máxima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2009 (MÁXIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					6,46			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
357	31,900	24,900	77,750	77,750	2,500	0,000	0	24
358	31,700	24,600	81,500	81,500	1,900	0,600	0	24
359	32,000	24,900	77,250	77,250	2,800	0,400	0	24
360	32,100	25,200	77,000	77,000	2,900	0,000	0	24
361	32,100	26,300	76,000	76,000	4,000	0,000	0	24
362	32,600	24,600	73,500	73,500	3,500	0,000	0	24
363	32,800	23,900	79,500	79,500	2,700	0,000	0	24
364	31,000	25,900	76,750	76,750	2,500	0,000	0	24
365	32,400	23,900	73,250	73,250	2,400	0,000	0	24

Fonte: FUNCEME (2020).

Quadro 4.1 – Condições de contorno climáticas: precipitação mínima.

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2013 (MÍNIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					2,43			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
1	31,200	25,200	80,000	80,000	3,100	4,800	0	24
2	31,700	24,700	76,000	76,000	3,200	1,400	0	24
3	29,600	24,300	85,250	85,250	1,800	7,500	0	24
4	31,000	24,900	78,250	78,250	3,300	3,200	0	24
5	30,200	24,900	84,000	84,000	1,900	0,500	0	24
6	31,000	24,700	79,500	79,500	3,600	2,500	0	24
7	32,200	24,900	72,000	72,000	3,600	1,000	0	24
8	32,000	25,900	72,500	72,500	4,600	0,000	0	24
9	32,300	26,300	74,000	74,000	2,600	0,000	0	24
10	32,000	26,300	73,000	73,000	3,500	0,000	0	24
11	31,600	26,300	72,000	72,000	4,100	0,000	0	24
12	31,900	26,500	73,250	73,250	4,800	0,000	0	24
13	32,400	24,900	71,250	71,250	3,300	0,000	0	24
14	30,900	25,000	85,500	85,500	2,500	9,600	0	24
15	31,800	25,900	83,000	83,000	2,500	2,200	0	24
16	30,900	25,300	80,250	80,250	3,500	3,400	0	24
17	32,100	26,300	75,500	75,500	1,800	0,300	0	24
18	31,900	25,400	75,500	75,500	2,800	0,000	0	24
19	31,400	24,100	81,750	81,750	2,100	0,700	0	24
20	31,300	23,100	82,000	82,000	1,800	9,600	0	24
21	31,600	25,600	79,750	79,750	2,200	0,000	0	24
22	32,000	26,500	76,500	76,500	3,200	0,000	0	24
23	32,200	26,400	75,250	75,250	1,500	0,000	0	24
24	32,400	25,500	74,500	74,500	2,900	0,000	0	24
25	31,800	26,300	75,750	75,750	2,000	0,000	0	24
26	32,400	24,300	76,250	76,250	3,900	0,000	0	24
27	32,400	26,100	72,000	72,000	2,500	0,000	0	24
28	32,500	25,300	71,750	71,750	3,000	0,000	0	24
29	32,000	26,100	67,750	67,750	2,100	0,000	0	24
30	32,400	24,300	73,000	73,000	3,000	0,000	0	24
31	32,200	26,200	69,500	69,500	1,800	0,000	0	24
32	32,200	26,500	70,750	70,750	3,600	0,000	0	24
33	32,600	26,700	71,500	71,500	5,400	0,000	0	24
34	33,000	25,900	76,000	76,000	2,900	0,000	0	24
35	32,500	25,600	74,250	74,250	3,700	0,000	0	24
36	32,000	25,500	75,750	75,750	2,600	0,700	0	24
37	32,000	25,700	76,000	76,000	2,200	0,600	0	24
38	31,500	25,500	76,750	76,750	2,700	1,200	0	24

Quadro 4.2 – Condições de contorno climáticas: precipitação mínima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2013 (MÍNIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					2,43			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
39	33,500	26,500	71,250	71,250	3,500	0,700	0	24
40	33,000	26,900	70,250	70,250	3,200	0,000	0	24
41	33,100	25,300	70,500	70,500	3,300	0,300	0	24
42	34,000	26,500	72,750	72,750	3,900	0,000	0	24
43	34,600	25,500	70,250	70,250	2,900	0,000	0	24
44	34,600	26,900	73,750	73,750	3,900	0,300	0	24
45	33,600	24,300	77,000	77,000	2,800	2,300	0	24
46	29,900	24,700	88,500	88,500	1,900	10,200	0	24
47	32,000	24,600	80,000	80,000	2,600	28,400	0	24
48	28,600	23,900	92,000	92,000	1,300	9,500	0	24
49	32,400	24,900	83,750	83,750	2,300	6,300	0	24
50	28,900	23,600	85,750	85,750	2,200	10,800	0	24
51	31,600	23,700	76,000	76,000	3,700	38,200	0	24
52	32,400	25,800	71,250	71,250	4,200	0,000	0	24
53	32,400	25,100	72,500	72,500	3,600	0,000	0	24
54	32,000	23,700	75,000	75,000	3,100	0,000	0	24
55	31,800	26,200	72,500	72,500	3,000	0,000	0	24
56	32,100	24,300	73,500	73,500	3,000	0,000	0	24
57	33,100	24,900	73,000	73,000	3,900	0,000	0	24
58	32,600	26,800	73,000	73,000	2,700	0,000	0	24
59	32,200	26,300	75,250	75,250	3,400	0,000	0	24
60	32,000	25,500	74,250	74,250	4,500	0,000	0	24
61	33,400	26,300	73,500	73,500	2,800	0,000	0	24
62	33,900	25,900	71,250	71,250	3,400	0,000	0	24
63	32,200	25,500	76,500	76,500	3,200	0,000	0	24
64	33,000	25,700	74,750	74,750	3,600	0,000	0	24
65	32,900	26,800	73,750	73,750	3,800	0,000	0	24
66	31,300	26,100	72,750	72,750	3,500	0,000	0	24
67	33,200	25,300	69,750	69,750	2,600	0,400	0	24
68	32,800	25,500	74,750	74,750	3,000	0,000	0	24
69	32,200	24,900	78,750	78,750	3,100	3,400	0	24
70	33,100	26,800	76,750	76,750	2,800	0,000	0	24
71	32,700	26,700	74,000	74,000	2,800	0,000	0	24
72	32,200	26,100	76,250	76,250	2,800	0,000	0	24
73	32,800	26,900	77,500	77,500	2,500	0,000	0	24
74	32,900	25,600	72,750	72,750	2,800	0,000	0	24
75	29,600	25,300	85,500	85,500	3,100	11,800	0	24
76	31,800	25,600	77,000	77,000	2,600	12,800	0	24
77	31,800	25,200	80,750	80,750	2,800	10,000	0	24

Quadro 4.3 – Condições de contorno climáticas: precipitação mínima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2013 (MÍNIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					2,43			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
78	29,400	24,900	86,750	86,750	1,500	2,400	0	24
79	30,800	24,700	82,000	82,000	2,300	7,000	0	24
80	31,800	24,800	76,250	76,250	2,700	0,700	0	24
81	31,500	25,100	77,000	77,000	2,500	0,200	0	24
82	31,300	26,800	75,750	75,750	2,300	0,800	0	24
83	30,900	25,800	80,500	80,500	2,000	0,600	0	24
84	31,400	25,500	79,000	79,000	1,200	2,400	0	24
85	31,800	24,900	78,250	78,250	2,100	5,000	0	24
86	31,700	24,900	81,250	81,250	2,500	6,000	0	24
87	31,600	24,900	80,000	80,000	2,100	3,600	0	24
88	32,200	26,600	75,000	75,000	2,300	0,100	0	24
89	32,200	25,900	77,000	77,000	3,400	0,700	0	24
90	32,600	25,300	76,250	76,250	3,600	4,800	0	24
91	32,600	26,100	73,250	73,250	2,300	0,100	0	24
92	30,900	23,500	75,750	75,750	1,700	0,000	0	24
93	31,800	23,400	74,250	74,250	2,200	7,400	0	24
94	30,600	24,900	88,000	88,000	1,200	2,000	0	24
95	30,900	23,600	79,750	79,750	2,100	26,400	0	24
96	32,000	25,100	77,000	77,000	2,600	0,300	0	24
97	31,800	25,100	78,000	78,000	1,600	0,000	0	24
98	29,900	25,300	84,750	84,750	0,300	0,800	0	24
99	31,800	24,300	82,000	82,000	1,800	12,400	0	24
100	32,000	25,100	80,750	80,750	2,000	0,100	0	24
101	32,600	25,200	75,250	75,250	3,200	0,000	0	24
102	32,400	25,300	73,000	73,000	2,300	0,000	0	24
103	32,200	25,000	76,000	76,000	2,300	0,000	0	24
104	32,400	24,100	72,250	72,250	2,100	0,000	0	24
105	32,600	24,900	75,000	75,000	2,600	0,000	0	24
106	32,800	25,900	73,750	73,750	2,500	0,000	0	24
107	32,600	25,200	76,000	76,000	1,500	0,000	0	24
108	30,700	25,700	83,500	83,500	1,200	10,800	0	24
109	32,000	24,100	83,750	83,750	1,700	5,600	0	24
110	31,600	22,800	81,500	81,500	1,900	32,100	0	24
111	31,600	24,100	79,000	79,000	1,500	0,000	0	24
112	31,000	23,900	83,500	83,500	1,500	7,800	0	24
113	30,400	23,100	84,750	84,750	1,300	12,300	0	24
114	28,400	22,900	90,250	90,250	1,700	16,800	0	24
115	31,200	23,900	86,250	86,250	2,000	5,600	0	24
116	31,700	24,300	79,500	79,500	2,600	4,200	0	24

Quadro 4.4 – Condições de contorno climáticas: precipitação mínima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2013 (MÍNIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					2,43			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
117	32,000	24,300	78,500	78,500	2,400	2,400	0	24
118	30,800	25,100	82,000	82,000	2,000	2,100	0	24
119	31,500	24,100	80,750	80,750	1,900	0,100	0	24
120	27,700	23,700	91,250	91,250	2,000	5,300	0	24
121	31,200	24,300	81,750	81,750	2,300	16,000	0	24
122	31,600	24,500	80,750	80,750	2,700	1,600	0	24
123	32,400	24,900	70,500	70,500	3,000	0,000	0	24
124	32,000	24,500	74,250	74,250	2,900	0,000	0	24
125	30,900	25,000	77,750	77,750	1,700	0,000	0	24
126	31,600	23,200	76,750	76,750	2,600	1,000	0	24
127	32,000	24,100	79,000	79,000	2,100	0,000	0	24
128	32,400	25,200	76,500	76,500	2,000	0,000	0	24
129	31,600	24,900	79,000	79,000	1,900	5,200	0	24
130	32,200	25,000	74,500	74,500	2,600	0,000	0	24
131	32,200	24,100	73,500	73,500	2,000	0,000	0	24
132	31,800	24,300	78,250	78,250	2,400	2,100	0	24
133	32,200	25,400	72,250	72,250	2,200	0,000	0	24
134	29,500	24,400	93,500	93,500	2,000	3,800	0	24
135	31,000	23,200	79,000	79,000	2,700	32,300	0	24
136	31,800	24,300	79,500	79,500	2,100	0,000	0	24
137	31,900	24,900	80,000	80,000	1,900	0,200	0	24
138	29,800	24,800	87,750	87,750	1,700	2,300	0	24
139	30,200	23,600	86,500	86,500	2,100	27,600	0	24
140	32,300	22,800	82,500	82,500	1,200	14,800	0	24
141	29,100	24,400	88,750	88,750	5,100	1,500	0	24
142	30,800	24,600	85,500	85,500	1,300	10,000	0	24
143	29,800	23,900	88,750	88,750	1,700	14,100	0	24
144	31,200	24,100	84,250	84,250	2,400	5,200	0	24
145	31,600	24,500	82,500	82,500	2,900	0,100	0	24
146	31,200	24,500	78,250	78,250	2,800	3,800	0	24
147	31,000	23,900	74,000	74,000	3,600	0,000	0	24
148	31,600	24,400	74,500	74,500	3,400	0,000	0	24
149	30,900	24,100	81,250	81,250	2,000	2,700	0	24
150	31,300	23,300	73,750	73,750	4,000	0,000	0	24
151	31,200	23,700	76,500	76,500	2,900	0,000	0	24
152	32,400	23,800	73,000	73,000	1,800	0,000	0	24
153	31,000	23,300	83,250	83,250	1,800	0,000	0	24
154	31,600	23,300	78,750	78,750	1,800	5,000	0	24
155	30,900	23,900	80,500	80,500	2,100	0,000	0	24

Quadro 4.5 – Condições de contorno climáticas: precipitação mínima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2013 (MÍNIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					2,43			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
156	29,700	23,100	87,500	87,500	0,900	23,800	0	24
157	30,000	23,200	85,750	85,750	2,800	3,800	0	24
158	30,800	22,700	78,750	78,750	2,400	8,800	0	24
159	31,400	22,500	76,250	76,250	2,200	0,000	0	24
160	29,600	23,700	83,000	83,000	2,200	0,000	0	24
161	31,000	23,300	73,500	73,500	2,200	0,300	0	24
162	30,200	24,900	83,500	83,500	2,300	9,800	0	24
163	30,800	23,300	76,250	76,250	2,700	0,000	0	24
164	30,800	23,500	82,250	82,250	2,400	8,500	0	24
165	29,400	23,100	87,500	87,500	1,700	12,800	0	24
166	30,600	23,600	82,250	82,250	2,300	0,800	0	24
167	30,600	23,800	81,750	81,750	2,300	0,000	0	24
168	30,400	23,900	81,750	81,750	2,000	10,200	0	24
169	30,800	23,900	82,250	82,250	2,000	1,000	0	24
170	30,900	23,800	78,250	78,250	2,800	1,000	0	24
171	31,000	23,900	78,250	78,250	2,600	0,000	0	24
172	28,600	22,100	87,500	87,500	1,600	12,000	0	24
173	30,700	23,000	81,250	81,250	1,600	12,400	0	24
174	30,900	22,900	77,000	77,000	1,900	0,500	0	24
175	29,100	22,700	85,250	85,250	1,600	58,100	0	24
176	31,300	23,900	78,500	78,500	2,100	0,200	0	24
177	30,600	24,300	78,000	78,000	2,500	0,000	0	24
178	31,400	25,100	74,750	74,750	2,500	0,000	0	24
179	30,600	25,000	81,500	81,500	2,100	1,600	0	24
180	28,900	23,600	92,500	92,500	1,700	1,300	0	24
181	29,000	22,900	89,500	89,500	1,100	46,000	0	24
182	31,600	23,300	75,250	75,250	1,900	2,000	0	24
183	31,300	23,100	78,000	78,000	2,700	0,000	0	24
184	29,700	23,000	87,250	87,250	2,000	14,200	0	24
185	30,200	21,900	84,500	84,500	2,500	0,800	0	24
186	30,800	23,400	75,000	75,000	1,500	0,000	0	24
187	29,400	23,600	79,250	79,250	2,300	14,400	0	24
188	30,800	23,600	75,000	75,000	2,900	0,600	0	24
189	30,200	23,300	78,000	78,000	2,900	0,000	0	24
190	30,200	23,000	80,250	80,250	1,400	0,000	0	24
191	32,000	23,600	75,250	75,250	2,300	5,800	0	24
192	30,800	21,900	72,500	72,500	3,600	0,000	0	24
193	29,600	22,700	78,250	78,250	2,300	8,400	0	24
194	30,100	21,500	79,500	79,500	1,900	0,400	0	24

Quadro 4.6 – Condições de contorno climáticas: precipitação mínima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2013 (MÍNIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					2,43			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
195	30,200	23,500	79,250	79,250	2,700	1,200	0	24
196	30,100	22,700	80,000	80,000	2,600	13,800	0	24
197	30,000	22,700	82,500	82,500	1,700	0,800	0	24
198	30,700	23,000	79,500	79,500	2,600	0,400	0	24
199	30,200	24,900	76,500	76,500	3,300	0,000	0	24
200	29,700	23,300	81,750	81,750	3,300	9,200	0	24
201	30,800	22,900	78,500	78,500	1,900	0,200	0	24
202	30,800	23,100	80,250	80,250	1,800	0,000	0	24
203	29,600	23,900	87,250	87,250	1,300	1,600	0	24
204	31,900	22,300	76,500	76,500	2,900	0,000	0	24
205	30,000	23,300	79,750	79,750	2,700	0,000	0	24
206	30,700	25,000	78,500	78,500	3,600	0,000	0	24
207	30,200	23,500	81,500	81,500	2,100	4,800	0	24
208	30,500	23,100	75,500	75,500	2,700	6,600	0	24
209	31,700	23,100	76,250	76,250	2,200	0,000	0	24
210	30,800	22,400	73,500	73,500	2,600	0,000	0	24
211	31,200	23,500	71,500	71,500	1,900	1,800	0	24
212	31,700	22,800	70,000	70,000	2,200	0,000	0	24
213	31,500	23,100	70,250	70,250	4,100	0,000	0	24
214	31,800	22,800	73,500	73,500	3,100	0,000	0	24
215	31,400	22,300	72,750	72,750	3,700	0,000	0	24
216	29,900	23,300	73,250	73,250	3,400	0,000	0	24
217	30,400	23,100	77,500	77,500	3,700	0,000	0	24
218	30,700	24,000	73,500	73,500	3,500	0,000	0	24
219	30,200	23,900	68,250	68,250	4,200	0,000	0	24
220	31,400	22,500	65,500	65,500	3,100	0,000	0	24
221	31,500	23,400	73,500	73,500	4,100	0,000	0	24
222	31,200	24,500	72,500	72,500	3,700	0,000	0	24
223	31,900	23,500	68,750	68,750	3,400	4,000	0	24
224	30,200	23,330	72,000	72,000	3,500	0,000	0	24
225	31,200	23,330	71,750	71,750	4,500	0,000	0	24
226	31,800	24,100	75,250	75,250	3,900	0,000	0	24
227	30,400	23,700	73,750	73,750	3,800	5,000	0	24
228	30,800	23,500	74,250	74,250	4,300	0,700	0	24
229	30,600	24,500	73,250	73,250	3,700	0,000	0	24
230	31,000	24,200	80,250	80,250	3,200	1,700	0	24
231	31,400	23,700	74,250	74,250	3,800	0,000	0	24
232	31,400	23,800	70,250	70,250	4,500	0,000	0	24
233	31,500	23,600	68,250	68,250	4,000	0,000	0	24

Quadro 4.7 – Condições de contorno climáticas: precipitação mínima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2013 (MÍNIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					2,43			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
234	31,400	23,700	71,000	71,000	3,800	0,000	0	24
235	31,700	24,800	72,250	72,250	3,600	0,000	0	24
236	32,400	24,700	69,000	69,000	3,800	0,000	0	24
237	32,300	22,800	70,750	70,750	3,000	0,000	0	24
238	32,800	23,700	70,750	70,750	3,100	0,000	0	24
239	31,800	23,300	77,250	77,250	2,700	0,000	0	24
240	30,900	24,500	74,500	74,500	3,000	0,000	0	24
241	30,200	24,600	83,000	83,000	4,300	1,800	0	24
242	32,200	25,100	78,750	78,750	3,200	0,300	0	24
243	32,600	24,300	74,250	74,250	3,900	0,000	0	24
244	32,800	23,800	72,750	72,750	3,600	0,000	0	24
245	30,900	23,200	72,250	72,250	3,200	0,000	0	24
246	31,400	24,000	77,750	77,750	3,100	0,000	0	24
247	30,400	23,500	80,000	80,000	4,000	6,400	0	24
248	30,400	24,400	82,000	82,000	3,900	1,400	0	24
249	31,200	23,700	76,000	76,000	3,700	0,000	0	24
250	30,900	23,600	74,000	74,000	3,200	0,000	0	24
251	31,200	24,900	72,750	72,750	4,400	0,000	0	24
252	32,200	24,600	74,250	74,250	3,100	0,000	0	24
253	32,400	25,500	77,250	77,250	3,800	0,000	0	24
254	31,800	23,700	67,250	67,250	4,100	0,000	0	24
255	31,000	22,700	71,750	71,750	4,100	0,000	0	24
256	31,400	24,600	78,500	78,500	4,000	0,000	0	24
257	31,200	25,300	74,250	74,250	5,000	0,000	0	24
258	31,300	25,100	77,000	77,000	4,400	0,000	0	24
259	31,700	24,000	77,250	77,250	4,200	0,000	0	24
260	31,600	24,300	74,250	74,250	4,200	0,000	0	24
261	32,400	24,100	71,500	71,500	4,000	0,000	0	24
262	31,800	24,000	69,500	69,500	4,400	0,000	0	24
263	33,300	23,100	68,500	68,500	3,800	0,000	0	24
264	33,000	22,800	72,750	72,750	3,200	0,000	0	24
265	31,800	24,500	73,250	73,250	4,400	0,500	0	24
266	30,900	23,900	76,500	76,500	3,600	1,000	0	24
267	31,200	23,300	77,750	77,750	3,200	0,000	0	24
268	30,800	24,300	76,000	76,000	2,700	0,000	0	24
269	31,700	23,100	76,000	76,000	3,400	0,000	0	24
270	31,500	24,600	76,750	76,750	3,000	1,200	0	24
271	31,900	24,300	70,000	70,000	3,600	0,000	0	24
272	31,800	25,200	66,750	66,750	5,300	0,000	0	24

Quadro 4.8 – Condições de contorno climáticas: precipitação mínima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2013 (MÍNIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					2,43			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
273	31,800	25,300	72,750	72,750	3,900	0,000	0	24
274	31,600	24,000	76,500	76,500	3,300	0,500	0	24
275	31,700	24,100	72,500	72,500	4,000	0,000	0	24
276	32,400	25,100	74,250	74,250	3,900	0,000	0	24
277	32,200	25,400	70,000	70,000	3,800	0,000	0	24
278	32,000	24,100	73,750	73,750	3,800	0,000	0	24
279	31,600	23,600	75,750	75,750	2,300	0,000	0	24
280	32,200	25,300	73,000	73,000	2,800	0,000	0	24
281	32,200	24,100	74,500	74,500	3,800	4,600	0	24
282	32,800	25,600	73,500	73,500	3,800	0,000	0	24
283	32,500	24,800	74,500	74,500	4,000	0,000	0	24
284	32,500	24,700	68,000	68,000	4,100	0,000	0	24
285	31,600	25,600	73,250	73,250	4,600	0,000	0	24
286	31,200	23,700	74,750	74,750	3,800	0,000	0	24
287	31,800	22,700	72,750	72,750	3,800	0,000	0	24
288	31,800	24,900	72,000	72,000	3,800	0,100	0	24
289	31,800	24,100	73,500	73,500	3,700	0,300	0	24
290	31,500	24,500	70,750	70,750	3,400	0,000	0	24
291	31,800	24,400	74,750	74,750	4,600	0,000	0	24
292	32,100	24,300	69,000	69,000	3,400	0,000	0	24
293	32,200	24,500	74,250	74,250	4,400	0,000	0	24
294	32,600	24,900	72,750	72,750	3,600	0,200	0	24
295	32,000	25,100	69,250	69,250	3,100	0,000	0	24
296	31,400	25,100	79,250	79,250	2,600	1,000	0	24
297	32,000	24,900	74,750	74,750	3,600	2,100	0	24
298	32,400	25,300	74,250	74,250	3,600	0,000	0	24
299	31,800	25,100	75,250	75,250	2,900	0,300	0	24
300	32,000	24,900	76,000	76,000	3,200	0,300	0	24
301	31,500	25,300	75,000	75,000	3,600	0,000	0	24
302	31,400	25,100	69,500	69,500	3,800	0,000	0	24
303	31,400	24,800	73,250	73,250	2,800	0,000	0	24
304	32,000	25,500	66,500	66,500	4,000	0,000	0	24
305	31,900	25,300	70,000	70,000	3,600	0,000	0	24
306	32,600	25,300	77,250	77,250	3,900	0,100	0	24
307	32,600	24,900	75,750	75,750	3,700	0,500	0	24
308	31,800	24,700	80,000	80,000	3,000	2,600	0	24
309	32,100	25,200	76,500	76,500	3,900	0,000	0	24
310	32,600	25,200	70,250	70,250	3,900	0,000	0	24
311	33,000	24,700	71,250	71,250	3,700	0,000	0	24

Quadro 4.9 – Condições de contorno climáticas: precipitação mínima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2013 (MÍNIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					2,43			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
312	32,200	25,900	75,750	75,750	3,400	0,000	0	24
313	32,400	25,700	70,500	70,500	3,500	0,000	0	24
314	32,400	25,600	73,250	73,250	4,500	0,000	0	24
315	31,800	24,900	77,750	77,750	3,100	0,500	0	24
316	31,900	24,800	73,250	73,250	3,400	0,500	0	24
317	31,800	25,700	70,250	70,250	4,500	0,000	0	24
318	31,800	25,300	75,500	75,500	3,500	0,000	0	24
319	31,700	25,600	74,750	74,750	3,800	0,200	0	24
320	30,300	24,900	76,250	76,250	4,000	0,500	0	24
321	30,300	25,100	73,000	73,000	4,100	0,000	0	24
322	32,100	24,000	69,500	69,500	4,300	0,000	0	24
323	31,800	24,300	72,000	72,000	5,200	0,000	0	24
324	29,200	25,100	73,750	73,750	3,100	0,000	0	24
325	31,400	25,300	75,500	75,500	3,300	0,000	0	24
326	30,800	24,900	82,250	82,250	3,000	0,000	0	24
327	31,400	24,300	76,500	76,500	2,600	0,600	0	24
328	32,300	25,700	73,500	73,500	2,800	0,000	0	24
329	32,200	24,300	72,500	72,500	5,200	0,000	0	24
330	31,800	25,500	80,250	80,250	3,600	0,000	0	24
331	30,300	24,700	74,250	74,250	3,000	0,000	0	24
332	31,400	23,700	71,500	71,500	3,900	0,000	0	24
333	31,400	25,300	79,250	79,250	4,400	0,000	0	24
334	32,000	24,100	74,750	74,750	3,600	5,700	0	24
335	33,200	25,600	69,250	69,250	3,000	0,000	0	24
336	31,900	25,600	73,750	73,750	2,800	0,000	0	24
337	32,700	24,700	73,000	73,000	3,900	0,000	0	24
338	31,700	25,600	73,250	73,250	2,900	0,000	0	24
339	31,800	25,100	73,250	73,250	3,200	0,000	0	24
340	32,000	25,700	75,750	75,750	2,800	0,000	0	24
341	32,200	25,600	74,750	74,750	2,800	0,000	0	24
342	32,000	24,600	74,250	74,250	3,400	0,000	0	24
343	32,200	25,900	72,000	72,000	4,900	0,000	0	24
344	32,500	24,300	69,750	69,750	2,000	0,500	0	24
345	31,200	25,100	70,500	70,500	3,200	0,000	0	24
346	31,600	25,300	75,500	75,500	2,700	0,000	0	24
347	32,100	23,800	73,250	73,250	2,700	0,000	0	24
348	32,100	24,400	72,750	72,750	3,300	0,000	0	24
349	31,600	25,400	67,750	67,750	3,300	0,000	0	24
350	31,800	25,500	74,250	74,250	3,200	0,000	0	24

Quadro 4.10 – Condições de contorno climáticas: precipitação mínima (continuação).

DADOS CLIMATOLÓGICOS - ANO 2013 (MÍNIMO)								
Município		Fortaleza			Estação Convencional (82397)			
Média de precipitação anual					2,43			
Dia	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Vento (m/s)	Precipitação (mm)	Período (h)	
	Máx	Mín	Máx	Mín			Início	Fim
351	32,000	25,700	72,750	72,750	2,700	0,000	0	24
352	31,800	25,500	73,750	73,750	3,600	0,000	0	24
353	31,900	25,300	75,000	75,000	2,700	0,000	0	24
354	29,200	24,500	79,750	79,750	2,100	7,900	0	24
355	29,900	25,600	76,750	76,750	1,900	0,200	0	24
356	32,400	25,100	78,000	78,000	3,800	0,700	0	24
357	31,900	26,100	74,000	74,000	3,800	0,400	0	24
358	32,800	25,800	71,250	71,250	3,600	0,000	0	24
359	32,400	26,100	70,500	70,500	4,600	0,000	0	24
360	32,100	26,200	74,000	74,000	3,000	0,000	0	24
361	32,500	25,100	73,500	73,500	3,900	0,000	0	24
362	32,500	26,400	74,000	74,000	3,600	0,000	0	24
363	32,300	25,300	72,500	72,500	4,100	0,400	0	24
364	31,900	25,600	78,500	78,500	3,000	0,500	0	24
365	32,100	25,500	67,500	67,500	4,400	0,000	0	24

Fonte: FUNCEME (2020).